

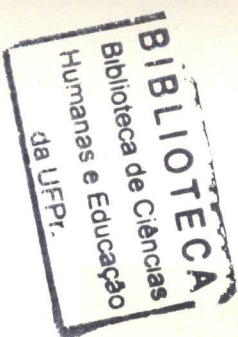
MIS HORS SERVICE
PAR LA MÉDIATHEQUE

Système, structure, fonction, évolution

essai d'analyse épistémologique

PIERRE DELATTRE
Commissariat à l'Énergie Atomique

préface de
ANDRÉ LICHNEROWICZ
Membre de l'Académie des Sciences
Professeur au Collège de France
2^e ÉDITION



1214
D345
S

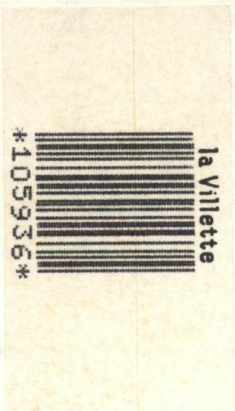
Du même auteur chez le même éditeur :

L'évolution des systèmes moléculaires - Bases théoriques et applications à la Chimie et à la Biologie.

Préface du Professeur René Thom, Institut des Hautes Etudes Scientifiques.

Ouvrage collectif :

P. Delattre, M. Thellier (Eds.) - Elaboration et Justification des modèles - Applications en biologie - 2 volumes.



PR-001779311

Doação
Registro Nº 687560
09/10/2017
Humanas
Système, structure, fonction, évolution
Delattre, Pierre, 1926-
Bibliothèque d'histoire des scie
R\$ 18 00

© Maloine S.A. Editeur, 1971, 1985

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustrations, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants-droit ou ayants-cause, est illicite » (alinéa premier de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, sans aucune mention, constitue une contrefaçon.

« Il faudra cependant, si l'on veut continuer à savoir exactement ce que l'on dit, trouver une définition suffisamment nette des mots que l'on emploie. Ce n'est pas une des moindres difficultés de la physique moderne que cette subtilité, et quelquefois ce vague, de ses conceptions les plus fondamentales ».

Louis de Broglie — *Matière et Lumière*.

« Beaucoup de mots sont contre-indiqués. Nous les avons appris ; nous les répétons, nous croyons qu'ils ont un sens... utilisable ; mais ce sont des créations statistiques ; et par conséquent, des éléments qui ne peuvent entrer sans contrôle dans une construction ou opération exacte de l'esprit, qu'ils ne la rendent vaine ou illusoire. »

Paul Valéry — *L'idée fixe*.

PRÉFACE

Dans un texte préparatoire à l'Encyclopédie, Diderot distingue soigneusement « les sciences, les arts et les histoires ». Pour lui, grosso modo, une science se veut effort de connaissance et d'explication d'un champ de phénomènes, définie par ce champ et contribuant à le définir. Mais il semble sacrifier allègrement l'unité de la science. Comme l'a fort bien montré Piaget, le positivisme n'a fait qu'approfondir la définition d'une science par le champ des phénomènes observables auxquels elle a choisi de s'intéresser. Ennemi de toute entreprise véritablement théorique, le positivisme se veut cramponné aux observables et ne visant qu'à les relier par des lois numériques, aisément et directement vérifiables. Dans ses versions contemporaines, il conduit en sciences humaines par exemple, à ces monographies basées sur une statistique à ras de sol et qui ne débouchent sur nulle globalisation ou approche théorique. Il s'agit là de matériaux pour la science, mais non encore de science. Les essais embarrassés de classification linéaire des sciences, inspirés au XIX^e siècle par le positivisme, apparaissent trop souvent comme l'équivalent en ce temps des analyses médiévales des différents « miroirs du Monde ». C'est aussi le temps où tous croient et enseignent que les mathématiciens règnent sur la quantité et sur l'étendue ; or déjà à travers les algébristes anglais, à travers Riemann ou Dedekind, les mathématiciens ne savent plus ce qu'est cette prétendue quantité et cette prétendue étendue. Si le positivisme a été trop longtemps la philosophie explicite de beaucoup d'hommes de science, il reste que nous savons désormais qu'il n'est pas et n'a jamais été la philosophie implicite de l'entreprise scientifique elle-même dont l'ambition est toute autre et suppose, pour son accomplissement, l'achèvement de stades proprement théorétisants.

Notre science est devenue consciemment ce tissu indechirable, dont la trame est faite des résultats des analyses et des expériences privilégiées par lesquelles nous ensermons le réel, tandis que la chaîne théorique doit réunir bien des fils variés venus des différents domaines de notre expérience concrète. Mais l'entrelacs de cette chaîne et de cette trame ne s'effectue point selon les aimables et trop simples schémas décrits par l'épistémologie classique. Quels sont les instruments véritables des démarches théorétisantes et en quoi consistent-elles, quels sont notamment, aux différents niveaux les pas principaux de ces démarches ? Qu'y a-t-il de commun à l'entreprise du physicien,

de l'écologiste ou du psychologue ? La fortune qu'on connaît dans le passé les mots de fonction et d'évolution, dans le présent ceux de système et de structure et la confusion certaine qui continue à les entourer portent témoignage à la fois sur l'intérêt primordial de ces problèmes et sur notre relative maladresse à les aborder.

L'ouvrage de Monsieur Delattre présente un double et rare caractère : il est écrit par un physicien réfléchissant, à partir de l'expérience de sa discipline, sur les méthodes mises en jeu dans ce qu'elles ont d'universel par rapport aux champs des phénomènes vus du réel. Il vise à être une introduction, à la fois humble et ambitieuse, à cette *théorie générale des systèmes* dont on parle tant depuis presque un demi-siècle et qu'on ne voit jamais surgir.

Chacun des mots-clés système, structure, fonction, évolution, fait l'objet d'un chapitre d'analyse fine et profondément originale, illustrée d'exemples venus certes de la physique, mais auxquels il serait aisé de substituer des exemples venus de l'économie ou de la linguistique. Un bon usage des graphes et de leur classification permet une caractérisation claire et aussi peu ambiguë que possible des différents processus. Peut-être puis-je regretter seulement que le terme de « modèle » ne complète pas cette liste de mots-clés, regretter aussi une ou deux fois l'usage d'une distinction quantitatif-qualitatif qui ne me paraît pas relevante et recouvrirait plutôt une distinction liée à la connexité. Mais l'un des grands moments de ce livre qui en compte beaucoup paraît constitué par l'analyse donnée de la notion de structure à partir des processus concernant la donnée d'un système et par la distinction entre ce que l'auteur nomme une structure relationnelle et une structure totale qui sont en fait deux structures situées à deux niveaux différents de « l'échelle des types ».

Je suis certain que le lecteur attentif de ces pages, scientifique ou philosophe, sera tout naturellement conduit à mener, à partir de son champ d'expérience, sa propre réflexion sur les thèmes élaborés par l'auteur, en dialogue constant avec lui, et qu'il pourra ainsi bénéficier d'un éclairage nouveau en ce qui concerne les démarches de l'esprit scientifique.

André LICHTENROWICZ.

INTRODUCTION A LA 2^e ÉDITION

Quand ce livre a été écrit, les polémiques entre structuralisme et historicisme (ou évolutionnisme) étaient encore très vives. Il était alors courant d'opposer ces deux types d'appréhension de la réalité, et de mettre l'accent sur l'autonomie des concepts fondamentaux sur lesquels ils se fondaient respectivement. D'un côté la mise en évidence des structures stables, invariantes, auto-régulées si l'on peut dire ; de l'autre l'accent porté sur ce qui change au cours du temps dans l'organisation du monde qui nous entoure. Cette problématique, qui s'est surtout manifestée dans le domaine des sciences humaines, est réapparue sous des formes qui ne sont pas fondamentalement différentes dans d'autres champs d'investigation. Elle se retrouve, pratiquement identique du point de vue épistémologique, dans la recherche des connexions entre la mécanique classique et la thermodynamique, à travers les notions de réversibilité et d'irréversibilité.

Dans ces diverses situations, la question est en définitive de savoir si les deux types de phénomènes, les uns sur fond structurel stable, les autres susceptibles d'une évolution structurelle au bout d'un temps plus ou moins long, peuvent coexister dans un même système.

L'étude présentée dans ce livre répond affirmativement à cette interrogation, d'une manière que l'on a voulu aussi préciser que possible. Dans l'optique des recherches interdisciplinaires son actualité reste entière, car elle permet d'illustrer clairement l'un des écueils les plus fréquents de ce genre de préoccupations. En effet, établir des liens entre des disciplines spécialisées ne peut jamais se réduire au simple transfert des langages et des concepts de l'une à l'autre. Pour être significatifs, il est indispensable que ces liens mettent en œuvre un métalangage à l'intérieur duquel se retrouve en tant que cas particulier ce qui est propre à chacune des disciplines. En ce qui concerne les questions qui nous occupent ici, on verra que les difficultés et les autonomies apparentes résultent essentiellement de la transposition *ne varietur* du concept mathématique de structure dans le domaine des sciences naturelles et des sciences humaines, sans une prise en compte suffisante du fait que les problèmes posés, et les concepts élaborés pour les exprimer et les résoudre, peuvent être très différents selon le domaine considéré.

L'intérêt majeur de l'interdisciplinarité ne consiste pas seulement à ouvrir les disciplines refermées sur elles-mêmes ; il est aussi de montrer que cette transgression des frontières, pour être véritablement fructueuse, exige des précautions épistémologiques sérieuses.

INTRODUCTION A LA 1^{re} ÉDITION

Parmi les problèmes scientifiques importants qui se posent à notre époque, celui qui concerne les ensembles où un nombre plus ou moins grand d'éléments, matériels ou abstraits, interagissent, tient une place de premier plan. Sa résolution est loin d'être toujours possible, et une Théorie Générale des Systèmes est encore à naître, bien que l'on en parle depuis longtemps déjà.

Dans ce type de problème, les quatre concepts de système, de structure, de fonction et d'évolution, interviennent à chaque pas.

L'un de ces concepts, celui de structure, connaît actuellement une fortune tout à fait exceptionnelle. A côté de son utilisation dans des travaux scientifiques précis, comme ceux du Groupe Bourbaki en Mathématique, ou comme ceux de C. Lévi-Strauss en Anthropologie, on constate qu'il fait aussi l'objet d'une mode, et on le retrouve à ce titre un peu partout. Mais l'existence d'une mode, malgré son caractère toujours un peu superficiel, ne constitue pas un argument contre l'importance réelle de ce qu'elle tend à exprimer. On peut même, au contraire, dire que toute mode constitue un hommage, imprécis et souvent déformé, à une idée d'importance capitale mais dont la signification exacte n'est pas encore atteinte par la conscience claire. Cette situation est évidemment favorisée si le concept considéré se prête à des significations multiples et ambiguës qui laissent la place à toutes les interprétations.

Les trois autres concepts ne connaissent pas un sort aussi glorieux, peut-être parce que leur sens, étant apparemment plus étroit, se prête moins aux extensions faciles ; peut-être aussi parce que leur carrière publique est terminée ou pas encore commencée. La notion de système, avec le sens quelque peu péjoratif qui lui reste attaché depuis les abus de l'esprit de système et du dogmatisme, principalement en philosophie, est manipulée avec hésitation et circonspection. La notion d'évolution, après les tempêtes auxquelles elle a donné lieu dans les échanges entre milieux scientifiques et théologiques, semble avoir retrouvé sa place dans les laboratoires et les cabinets de réflexion. Quand à la notion de fonction, elle apparaît surtout réservée aux travaux scientifiques, principalement biologiques et médicaux, et ne connaît autrement qu'une faveur publique honnête et modérée, si ce n'est peut-être sous la forme de son adjectif « fonctionnel ».

Quoi qu'il en soit, les quatre concepts évoqués ici possèdent à des degrés divers une fluidité qui est en principe peu favorable à leur

utilisation pour une connaissance précise. Et cela est d'autant plus sensible que l'on se place dans l'optique d'une théorie plus rigoureuse. La nécessité de donner à chaque mot un contenu précis apparaît alors très vite. Poincaré avait sans doute raison lorsqu'il disait que « la mathématique n'a pas de symboles pour les idées confuses ». On ne peut pas, hélas, en dire autant lorsqu'il s'agit de l'utilisation de la mathématique dans les sciences de la Nature. Il s'avère malheureusement que la mathématisation d'un problème peut s'opérer sur des concepts vagues, ou contradictoires, ou mal choisis, ce qui entraîne des difficultés nombreuses et d'autant plus difficilement repérables qu'elles se cachent sous une apparente rigueur. L'exemple de la théorie du phlogistique est, à ce titre, justement célèbre. Et il serait bien étonnant que l'avenir ne réserve pas à certaines parties de notre science actuelle des critiques de cet ordre, ainsi par exemple que le pense Louis de Broglie à propos de la mécanique quantique.

Les quatre concepts que nous allons étudier sont en fait très dépendants les uns des autres. De là résulte une difficulté certaine d'exposition lorsque l'on cherche à expliciter leur contenu. La présentation discursive se prête mal à l'analyse de notions dont chacune, pour être précisée, nécessiterait la définition complète et préalable des autres. D'où la nécessité de procéder à de fréquents retours en arrière, ou à des renvois à des approfondissements ultérieurs. On est ainsi conduit à reprendre, à diverses étapes de l'étude, une même question qui se précise peu à peu à l'aide des nouvelles données acquises.

Parmi les questions traitées de cette manière, de proche en proche, l'une des plus fréquemment reprises au cours de la présente étude concerne les rapports entre les notions de structure et de fonction. Il s'agit là, en effet, d'un couple de première importance, très employé dans de nombreux domaines, et dont la signification imprécise ou trop intuitive peut entraîner de graves confusions. Parallèlement, le problème des interactions entre systèmes, c'est-à-dire le problème des systèmes de systèmes, a été traité de manière approfondie, à cause de son intérêt propre, et aussi parce qu'il est étroitement lié au couple « structure — fonction ».

Les difficultés que présente l'analyse épistémologique des quatre concepts étudiés sont certaines. Mais il est sans aucun doute utile d'essayer de les résoudre, car tout éclaircissement dans ce domaine devrait nous permettre de mieux comprendre un certain nombre de problèmes scientifiques fondamentaux qui se posent aujourd'hui, tout en éliminant quelques faux-problèmes qui masquent les questions véritablement importantes.

CHAPITRE I

LA NOTION DE SYSTÈME

La notion de système peut être définie, de manière tout à fait générale, comme correspondant à un ensemble d'éléments en interaction.

LES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME.

Les éléments peuvent être, selon les cas, des êtres matériels ou abstraits. La définition d'un élément fait appel à un certain nombre de données que l'on peut classer *a priori* en deux grandes catégories : les données qualitatives et les données quantitatives.

Énoncer une donnée qualitative dans la définition d'un élément revient à affirmer que cet élément possède un certain type de propriété. La notion de propriété qui vient d'être utilisée est évidemment très liée à la notion de fonction qui sera analysée plus loin. Pour le moment, nous nous contenterons de l'acception intuitive de ce terme. Les données quantitatives qui interviennent dans la définition d'un élément sont toujours associées aux données qualitatives dont elles servent à exprimer la mesure, c'est-à-dire le rapport relatif à un certain référentiel. On ne peut évidemment pas affirmer qu'une chose a telle ou telle mesure, sans admettre auparavant l'existence de cette chose. Ainsi, l'énoncé qui consiste à attribuer à un élément une grandeur correspondant à la mesure d'une certaine caractéristique contient en réalité deux prédicats successifs dont l'ordre n'est pas inversible :

— Un prédicat purement qualitatif (*q*), correspondant à l'affirmation d'existence d'une certaine caractéristique.

— Un prédicat quantitatif (*q*), attribuant une mesure à (*a*).

Cet ordre de succession est tellement évident que l'on finit, à force de sous-entendre le premier prédicat, par oublier que tout énoncé quantitatif contient en réalité les deux prédicats. Ce risque est d'autant plus grand que l'on a affaire à des sciences plus exactes, puisque ce qualificatif de « science exacte » est attribué aux domaines de la connaissance qui utilisent le plus largement les données quantitatives. En ce qui concerne les sciences non exactes, qu'il serait préférable d'appeler les sciences qualitatives, l'énoncé de prédicats du seul

premier type entraîne des difficultés liées surtout à la mathématisation. Ce terme de mathématisation doit être entendu ici au sens très général de traitement rigoureux des relations entre objets, et non pas seulement au sens restreint de traitement rigoureux des relations entre données exprimables numériquement.

Le rappel de la décomposition et de l'ordre de succession des prédicats intervenant dans la définition d'un objet peut paraître à priori inutile. Ces considérations sont cependant indispensables lorsque l'on aborde le problème de la définition des éléments d'un système, et nous verrons plus loin, à propos des notions de structure et d'évolution, que l'utilité des distinctions qui viennent d'être rappelées est très grande. Il semble en effet qu'une analyse tenant compte de ces distinctions est susceptible d'apporter quelques éclaircissements sur les équivoques et les malentendus nombreux auxquels donnent lieu très souvent les quatre concepts que nous nous proposons d'étudier. C'est également par cette voie qu'il semble possible d'atteindre à une meilleure compréhension des rapports mutuels qui peuvent exister entre sciences exactes et sciences qualitatives, les échanges souhaitables entre ces deux types de connaissance n'étant certainement pas à sens unique. Les sciences quantitatives ont aussi des limites et des carences, tout au moins sous les formes qui leur ont été données jusqu'à présent.

Ces points importants, qui n'ont été évoqués ci-dessus que très brièvement, seront repris de manière plus précise au cours des chapitres qui suivent, au fur et à mesure que le contenu des concepts étudiés apparaîtra plus clairement.

Ainsi, la définition d'un élément apparaît en définitive comme un ensemble d'énoncés constitués chacun, soit d'un couple de prédicats (a, q) , soit d'un seul prédicat de type (a) . La définition d'un élément quelconque comportera selon les cas, uniquement des couples (a, q) , ou uniquement des prédicats (a) , ou encore un mélange de couples (a, q) et de prédicats (a) non quantifiés.

La définition d'un même élément peut très bien ne pas être unique. La multiplicité des définitions possibles correspond même au cas le plus général. On peut à ce sujet distinguer les quatre types suivants de définitions :

- Les définitions fonctionnelles.
- La définition exhaustive.
- La définition pseudo-exhaustive ou universelle.
- Les définitions surabondantes.

Une *définition fonctionnelle* d'un élément contiendra toutes les caractéristiques qualitatives et quantitatives de cet élément nécessaires pour rendre compte, avec une précision donnée, du rôle et du comportement de cet élément dans le système étudié. La précision recherchée tient ici une place importante. S'il est généralement possible d'améliorer une théorie donnée ou un modèle donné en recherchant une meilleure précision sur les caractéristiques quantitatives (q) , cette

procédure se heurte souvent à des limites irréductibles. Pour lever cette difficulté, une méthode fréquemment utilisée consiste à opérer une extension de la théorie en introduisant de nouvelles caractéristiques (a) dans la définition des éléments. Ainsi la définition fonctionnelle d'un élément, pour un système ou un type de systèmes donnés, comportera souvent un nombre d'autant plus grand de prédicats que la précision recherchée sera plus grande. Les différents modèles de l'atome qui ont été proposés successivement, fournissent un bon exemple de cette méthode. Alors que le premier modèle de Bohr ne comportait comme prédicats (a) que la masse et la charge électrique des particules en présence, il a fallu ensuite introduire les moments magnétiques et les spins pour rendre compte avec plus de précision des observations expérimentales.

Le nombre de prédicats utilisés pour une définition fonctionnelle d'élément n'est cependant pas inévitablement lié de manière monotone à la précision recherchée. La forme de la théorie adoptée intervient également. En effet toute théorie, ou même tout modèle, a essentiellement pour objet d'établir un certain nombre de relations entre les caractéristiques des éléments qui interviennent dans le système étudié. Il arrive ainsi qu'une théorie fasse apparaître des relations, non seulement entre les caractéristiques d'éléments différents, mais aussi entre les caractéristiques d'un même élément. Un tel résultat, en montrant que les caractéristiques introduites dans la définition fonctionnelle ne sont pas toutes indépendantes, permet de réduire le nombre des prédicats utilisés pour cette définition. Autrement dit, le nombre et la nature des prédicats utilisés dans la définition fonctionnelle d'un élément dépendra en général de la théorie adoptée, c'est-à-dire en définitive des hypothèses qui la fondent. On a coutume d'accorder la plus grande valeur aux théories qui, pour rendre compte avec une précision donnée d'une certaine catégorie de phénomènes, utilisent non seulement le plus petit nombre d'hypothèses mais aussi le plus petit nombre de prédicats pour la définition fonctionnelle des éléments. Il est certain qu'interviennent dans ce jugement des raisons de commodité, c'est-à-dire d'économie de pensée, mais aussi sans doute des raisons d'esthétique.

Ce qui précède montre bien qu'un même élément, à l'intérieur d'un système donné, peut faire l'objet de plusieurs définitions fonctionnelles, selon la forme de la théorie adoptée et selon la précision recherchée. A plus forte raison pourra-t-il faire l'objet de nouvelles définitions fonctionnelles si l'on considère successivement son comportement à l'intérieur de systèmes différents.

Cette dernière considération nous introduit à la notion de *définition exhaustive* d'un élément. On appellera ainsi une définition comprenant un nombre suffisant de prédicats pour permettre de rendre compte du comportement de l'élément dans tous les systèmes possibles, et avec une précision infinie. La prise en considération de tous les systèmes possibles exigera la connaissance complète de l'univers et l'inventaire de tous les sous-systèmes composés des sous-ensembles des

parties de l'univers. La définition exhaustive d'un élément est donc en principe inaccessible, à la fois pour des raisons théoriques et pour des raisons pratiques, par les moyens scientifiques. L'impossibilité pratique intervient en outre au titre de la précision infinie qui serait requise. Il est à noter d'ailleurs que la définition exhaustive est très voisine de la *définition essentielle*, qui est d'ordre métaphysique. Bien que ce dernier type de définition fasse intervenir une hypothèse supplémentaire en ce qui concerne la réalité des caractéristiques attribuées à l'élément, ce que ne fait pas la définition exhaustive, il existe néanmoins en pratique une étroite parenté entre les deux types de définitions. En particulier il semble bien impossible, pour l'une comme pour l'autre, et même en admettant qu'elles soient accessibles, de démontrer leur caractère d'unicité. Il faudrait en effet pour cela faire au moins l'hypothèse qu'une théorie unitaire de l'univers est possible, et que cette théorie est unique.

Si la définition exhaustive d'un élément apparaît en principe inaccessible, dans le cadre de la méthodologie scientifique, on peut toutefois espérer atteindre dans un certain nombre de cas ce que l'on pourrait appeler une définition *pseudo-exhaustive* ou *universelle*. On ne prendra en considération pour cela que l'ensemble des systèmes dans lesquels l'élément est susceptible d'intervenir en pratique, et on limitera la précision requise, par exemple au maximum accessible compte tenu des possibilités expérimentales à l'époque considérée. Une définition *pseudo-exhaustive* sera donc susceptible d'évoluer au cours du temps ; elle sera en réalité une définition fonctionnelle applicable à l'ensemble des systèmes que l'on peut rencontrer en pratique, et dans lesquels intervient l'élément. On peut considérer comme étant de ce type la définition de l'électron faisant intervenir comme prédicats (*aa*) la masse, la charge électrique, le moment magnétique et le spin. Il est en effet possible, à partir de ces quatre caractéristiques qualitatives, de rendre compte du comportement de l'électron dans tous les systèmes où on le rencontre en pratique. Dans certains systèmes, l'atome par exemple, il sera nécessaire de tenir compte de ces quatre caractéristiques. Dans d'autres systèmes, comme par exemple celui qui correspond au mouvement de l'électron dans un champ électrique, les deux premières caractéristiques suffisent.

On peut distinguer enfin un troisième type de définition des éléments, les *définitions surabondantes*. Il s'agit des définitions qui contiennent plus de prédicats qu'il n'est nécessaire pour rendre compte du comportement de l'élément dans les systèmes considérés, et avec la précision choisie. D'après ce qui a été dit précédemment, on voit immédiatement qu'une définition fonctionnelle pourra être surabondante à plusieurs titres. Elle le sera d'abord s'il existe entre ses prédicats une ou plusieurs relations d'interdépendance que la théorie utilisée ne met pas en évidence. A ce titre, il ne sera jamais possible d'affirmer avec certitude qu'une définition fonctionnelle n'est pas surabondante. Une définition fonctionnelle d'élément, choisie pour l'étude de certains systèmes, peut également être surabon-

dante pour l'étude d'autres systèmes dans lesquels intervient l'élément. Il peut en être de même si, pour l'étude des systèmes initialement choisis on diminue la précision requise, ou si l'on ne porte plus l'attention que sur une partie plus restreinte des phénomènes dont ces systèmes sont le siège. Dans ces différents cas, le caractère surabondant des définitions fonctionnelles apparaît en général assez facilement.

La définition *pseudo-exhaustive*, étant applicable à un grand nombre de systèmes, sera en général surabondante pour certains de ces systèmes.

La notion de surabondance des définitions est très importante car elle constitue un guide sûr pour la simplification des théories et pour l'économie des hypothèses. Elle est également importante pour la généralisation des théories. Ce dernier point sera vu plus loin car il fait intervenir des considérations relatives aux interactions entre éléments d'un système, que nous n'avons pas encore abordées.

INTERACTIONS ET DÉFINITION DES ÉLÉMENTS.

Par définition même du système, il existe des interactions entre les éléments qui le composent. La nature de ces interactions peut être très diverse selon le type de système considéré. Par exemple, dans un système matériel pourront intervenir des champs de répulsion, d'attraction électrique, magnétique, des phénomènes de chocs mécaniques, etc... Ce sera précisément l'un des buts de la théorie élaborée pour le système considéré d'expliciter la nature de ces interactions, compte tenu des connaissances acquises antérieurement sur des systèmes de type voisin, des observations expérimentales relatives au système étudié, et en y ajoutant si besoin est un certain nombre d'hypothèses complémentaires. Cette question n'est pas ici d'un intérêt fondamental puisque nous n'étudions pas tel ou tel système particulier. Ce n'est donc pas la nature des interactions qui nous importe, mais bien plutôt les différents types de changements que peuvent provoquer ces interactions sur les éléments d'un système. C'est en effet par l'examen de ces changements que l'on pourra observer ou décrire le comportement du système.

Nous avons vu qu'un élément quelconque d'un système pouvait être défini, c'est-à-dire décrit, à l'aide d'un certain nombre de prédicats. Chacun de ces prédicats correspond à l'affirmation d'existence d'une caractéristique qualitative (*a*), accompagnée éventuellement d'une mesure (*q*) de cette caractéristique. Un élément *e* peut donc être représenté par un point dans un espace de configuration comportant autant de dimensions qu'il existe de caractéristiques qualitatives (*aa*) dans sa définition. Parmi ces dimensions on trouvera en général, dans les systèmes physiques, les coordonnées habituelles d'espace et de temps. Le système dans sa totalité peut ainsi être représenté par un certain nombre de points dans un espace de configuration comprenant toutes les dimensions nécessaires à la définition

des éléments qu'il comporte. En pratique, par suite de l'imprécision qui entache les caractéristiques quantitatives (q), on ne pourra en général que définir une certaine probabilité pour que le point représentatif d'un élément soit situé à l'intérieur d'un hypervolume de dimensions finies.

La représentation d'un élément dont la définition comporte une ou plusieurs caractéristiques qualitatives non accompagnées de mesure, apparaît *a priori* moins évidente. Il est nécessaire dans ce cas de faire une convention pour la représentation d'une dimension non quantifiée. Cette convention consistera à associer à chacun des prédicats uniquement qualitatifs une grandeur arbitraire ne pouvant prendre que deux valeurs dont l'une représentera l'existence et l'autre l'absence de la caractéristique qualitative considérée. Ces nombres arbitraires, que l'on peut appeler caractéristiques pseudo-quantitatives ou caractéristiques d'existence (k), seront par exemple 0 et 1. Ainsi, les caractéristiques (q) et les caractéristiques (k) n'obéiront pas en général à la même algèbre, les secondes relevant d'une algèbre Booleenne, alors que les premières relèveront le plus souvent d'une autre algèbre fixée par les modes de variation des grandeurs (q).

Le comportement d'un système donné dépend des relations qui existent entre les caractéristiques des éléments qui le composent, relations qui permettent d'exprimer les interactions se produisant entre les éléments. Ces interactions se traduiront en définitive par les deux types d'effets suivants au niveau des éléments :

— Modifications des seules caractéristiques quantitatives (q), ou de certaines d'entre elles seulement.

— Apparition ou disparition de caractéristiques qualitatives (a).

Dans le premier cas les éléments seront dits seulement *modifiables*, tandis que dans le second cas on les dira *transformables*. Selon que le système considéré comportera uniquement des éléments du premier type ou uniquement des éléments du second type, on l'appellera *système à éléments modifiables* ou *système à éléments transformables*. Si les deux types d'éléments coexistent dans le même système, celui-ci sera dit *système mixte*, et il sera nécessaire de bien spécifier quels sont les éléments susceptibles de transformation et quels sont ceux qui ne peuvent subir que des modifications au sens qui vient d'être donné à ces mots.

Selon les propriétés du système auquel il appartient, il peut arriver qu'un même élément soit modifiable dans un système et transformable dans un autre. Il ne s'agit donc pas là d'une caractéristique propre à un élément donné, mais bien plutôt d'une possibilité liée à son appartenance à tel ou tel système.

Le cas où la mesure (q) attribuée à une caractéristique qualitative (a) est susceptible de prendre la valeur zéro doit, dans l'optique de ce qui vient d'être dit, être également considéré comme conférant à l'élément la propriété d'être transformable. En effet, cette valeur

$q = 0$ correspond bien à la disparition de la caractéristique qualitative (a), que cette disparition soit temporaire ou définitive et quelle que soit la manière selon laquelle la grandeur q atteint la valeur zéro. Nous allons voir cependant que cette considération rigoriste appelle quelques réserves, et cela nous conduira au problème important de l'éventuelle discrimination en plusieurs catégories des caractéristiques utilisées pour la définition d'un élément.

La condition qui vient d'être énoncée comme devant être respectée pour pouvoir dire qu'un élément est modifiable ou transformable, apparaît en réalité mieux adaptée à certaines caractéristiques qu'à d'autres. Par exemple, si parmi les caractéristiques définissant l'élément se trouvent les coordonnées dans l'espace-temps habituel, et aussi éventuellement les dérivées des coordonnées d'espace par rapport au temps, il semble difficile d'appliquer rigoureusement la règle précédente. La simple annulation d'une des coordonnées d'espace d'un élément ne semble pas justifier, en effet, l'affirmation selon laquelle l'élément aurait subi une transformation, et cela d'autant plus si la valeur zéro n'est pas atteinte comme un état stable mais comme une situation de transit plus ou moins brève. Il en est de même, mais déjà à un degré moindre, pour les dérivées premières des coordonnées d'espace par rapport au temps, c'est-à-dire pour les composantes de la vitesse. En revanche, l'annulation d'une caractéristique telle que la charge électrique nous paraît bien correspondre à une transformation, c'est-à-dire à un *changement de nature* de l'élément.

Nous voyons ainsi apparaître une notion, à vrai dire intuitive et assez vague, selon laquelle il serait possible de séparer en deux catégories l'ensemble des caractéristiques servant à définir un élément et à rendre compte de son comportement dans un système donné. Ces deux catégories correspondraient, d'une part aux caractéristiques intrinsèques définissant en quelque sorte la nature de l'élément, et d'autre part à des caractéristiques extrinsèques se surajoutant aux autres sans les modifier c'est-à-dire sans changer la nature de l'élément. Cette dichotomie, apparemment satisfaisante pour l'esprit, est en réalité difficile à réaliser dès qu'on l'examine d'un peu près. Nous allons le voir sur un exemple emprunté à la physique.

Considérons un élément chargé électriquement, et immobilisé dans un référentiel donné. Pour rendre compte de son action sur d'autres éléments également immobilisés par rapport au référentiel, c'est-à-dire en définitive, pour exprimer les forces qui s'exercent sur ces éléments, nous aurons à tenir compte uniquement de la charge électrique de chacun, et éventuellement de la masse si l'on désire ne pas négliger les interactions de gravitation. Dans ce cas il nous paraîtra naturel de n'attribuer à l'élément comme prédicats qualitatifs, que la charge électrique et éventuellement la masse. Les coordonnées d'espace, nécessaires pour évaluer les interactions avec les autres éléments, apparaîtront bien comme des caractéristiques extrinsèques. Supposons maintenant que l'élément soit en mouvement dans le référentiel choisi, mais de manière telle que toutes les composantes d'ac-

célération soient nulles. On peut encore dans ce cas considérer que la masse et la charge électrique constituent les caractéristiques intrinsèques de l'élément, alors que les coordonnées de position et les composantes de la vitesse sont des caractéristiques extrinsèques qui n'interviennent que pour évaluer les interactions à chaque instant. Supposons enfin que l'élément soit en mouvement, mais avec des composantes d'accélération non toutes nulles. Alors apparaît un type d'interaction nouveau, dû à la présence d'un champ magnétique qui n'existait pas dans les cas précédents. On peut rendre compte des effets de ce champ en ajoutant aux caractéristiques précédemment utilisées un nouveau prédicat qualitatif, celui de masse ou de moment magnétique. Considérera-t-on que ce nouveau prédicat fait partie des caractéristiques intrinsèques ou des caractéristiques extrinsèques de l'élément ? On pressent ici que le choix présente un certain caractère d'arbitraire, et cette première impression est encore renforcée si l'on tient compte du fait que l'élément en repos dans un certain référentiel, peut être en mouvement accéléré par rapport à un autre référentiel.

On retrouverait une difficulté analogue en considérant l'élément en repos par rapport à un certain référentiel, mais animé d'un mouvement de rotation sur lui-même. Est-ce que ce mouvement de rotation devrait être considéré comme une caractéristique intrinsèque ou comme une caractéristique extrinsèque de l'élément ?

Les exemples qui précèdent font bien apparaître le fait que la distinction entre caractéristiques intrinsèques et extrinsèques peut comporter, au moins dans certains cas, un aspect conventionnel très net. En fait ce caractère conventionnel existe dans tous les systèmes, mais il peut être plus ou moins apparent et sa mise en évidence peut exiger, selon le type de système considéré, une analyse plus ou moins approfondie et délicate. C'est volontairement, et dans un but de clarté, que les exemples utilisés ci-dessus ont été choisis dans le domaine de la Physique, c'est-à-dire pour des systèmes dans l'étude desquels la rigueur est plus habituelle, peut-être parce que plus accessible, qu'elle ne l'est dans l'étude de bien d'autres systèmes. Mais on peut faire les mêmes constatations dans d'autres domaines, et par exemple en linguistique si l'on étudie le système constitué par les mots d'une phrase. Il est bien difficile ici également de discriminer sans équivoque parmi les caractéristiques qui définissent un mot, c'est-à-dire qui lui donnent une signification, celles qui lui seraient attribuables en propre et celles qui résultent de la présence des autres mots de la phrase. Et l'on sait que cette tâche est d'autant plus difficile que la phrase est écrite dans un style plus poétique où, précisément, l'on joue davantage sur les significations harmoniques, c'est-à-dire en définitive sur les interactions entre les mots.

Les difficultés qui viennent d'être évoquées apparaissent donc bien inhérentes à la notion même de système. Elles se traduisent en définitive par le fait qu'il est impossible, en toute rigueur, de définir ce qu'est un objet en soi, c'est-à-dire indépendamment de tout système.

En effet, attribuer une ou plusieurs caractéristiques à un objet quelconque est toujours le résultat de la description du comportement de cet objet tel qu'il nous apparaît dans le monde qui nous entoure, et ce comportement est toujours lié à l'interaction de cet élément avec d'autres éléments, ne serait-ce qu'avec l'observateur et les instruments qu'il utilise éventuellement. Par l'observation du comportement de l'élément dans un certain nombre de systèmes divers on peut espérer cependant dégager une définition pseudo-exhaustive ou universelle, c'est-à-dire comportant les caractéristiques qui apparaissent dans tous les schémas explicatifs relatifs aux différents systèmes que l'on peut avoir à étudier. Comme nous l'avons vu, la définition universelle et la définition essentielle sont deux choses différentes, et l'on ne peut même pas affirmer que la plus complète définition universelle doive à la limite devenir une définition essentielle. On ne peut franchir ce pas sans faire un certain nombre d'options, qui sont d'ordre métaphysique. Selon les différentes options possibles, on dira que la définition adoptée n'est qu'une représentation de notre esprit, sans aucune correspondance réelle concrète, ou au contraire que les caractéristiques ainsi atteintes correspondent bien à la réalité concrète, ou tout au moins à une partie de celle-ci. Ces prises de position philosophiques n'ont été rappelées ici que pour mémoire car il n'est pas nécessaire, pour l'étude scientifique de la nature, d'aller jusque-là. C'est même précisément à ce niveau que s'arrête la démarche scientifique.

On retiendra surtout, des considérations qui précèdent, que les caractéristiques qui servent à l'étude d'un système ne sont pas en principe attribuables sans convention, aux éléments d'une part, et au système d'autre part. Il n'en est pas moins vrai toutefois, que la distinction entre caractéristiques intrinsèques et caractéristiques extrinsèques est souvent d'une très grande utilité, et qu'elle peut être faite d'une manière plus ou moins habile. Il est même très fréquent que les critères adoptés pour cette distinction jouent un grand rôle dans la clarté, et surtout dans la généralité des théories que l'on élabore. Nous serons conduits, au chapitre V, à reprendre ce point à propos de la théorie des systèmes. Il suffira de dire ici, pour conclure ce chapitre, que la distinction entre les deux types de caractéristiques résulte en général d'un choix délibéré entre plusieurs possibilités. Ce choix dépend le plus souvent de nombreux facteurs, parmi lesquels il faut citer en premier lieu le niveau des observations dont doit rendre compte la théorie. Une démarche rationnelle aussi approfondie que possible est toujours indispensable pour aboutir à un choix convenable, mais il est bien rare que la réflexion rationnelle ne doive pas, ou ne soit pas en fait, complétée par un certain nombre de considérations plus ou moins intuitives dont le rôle n'est pas à négliger. En effet, la puissance heuristique d'une théorie, et par conséquent aussi les recherches expérimentales que celle-ci suggère, dépendent dans une large mesure du niveau où se situent les concepts, les axiomes, et les hypothèses qui forment le fondement des modèles explicatifs

utilisés. Ce point très important apparaîtra plus clairement au chapitre V lorsque nous examinerons les problèmes liés à la théorie des systèmes.

Avant d'étudier l'incidence des divers choix possibles sur le domaine de validité, et même sur l'intérêt que présente une théorie donnée, il est nécessaire de montrer comment la discrimination entre caractéristiques intrinsèques et extrinsèques se traduit de manière très explicite lorsque l'on cherche à représenter simultanément et de manière précise les éléments et leurs interactions. C'est ce que nous allons voir maintenant.

REPRÉSENTATION DES INTERACTIONS.

Le choix du modèle qui sert de fondement à la théorie d'un système donné comporte, ainsi que nous venons de le voir, une première phase correspondant à la définition des éléments. Les éléments ainsi définis sont en fait des éléments abstraits, ou si l'on préfère des états-repères que l'on suppose pouvoir être pris par les éléments réels du système. On opère ainsi une sorte de jalonnement de l'espace de configuration et l'on admet que ce jalonnement est suffisant, ou en tout cas adéquat, à la description des différents états que le système est susceptible de prendre. La théorie du système aura précisément pour but de rendre compte des états observés et des conditions dans lesquelles le système passe d'un état à un autre. Pour cela il est nécessaire, après avoir défini les états-repères, d'introduire les conditions correspondant au passage des éléments d'un état-repère à un autre état-repère. Cette seconde phase correspond à la définition et à l'évaluation des interactions, celles-ci exprimant et explicitant les relations que l'on suppose exister entre les éléments du système lorsque ceux-ci se confondent avec les états-repères. Ces fonctions d'interaction peuvent évidemment prendre des formes très diverses, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, selon la nature du système étudié. Nous en verrons quelques exemples plus loin. Le seul point commun à retenir ici est qu'une fonction d'interaction se traduit toujours par une relation entre un état-repère et un autre état-repère, ou plus généralement entre un ensemble d'états-repères et un autre ensemble d'états-repères. L'existence d'une telle relation indique simplement le fait que les états ainsi reliés ne sont pas indépendants. La nature de la dépendance doit être précisée dans chaque cas, mais elle revient toujours à exprimer les conditions dans lesquelles peuvent varier certaines des caractéristiques utilisées dans la définition des éléments. Les seules variations dont il est possible de tenir compte sont évidemment celles qui correspondent aux passages des éléments du système dans les différents états-repères utilisés pour le jalonnement de l'espace de configuration. Ceci montre bien l'importance du choix auquel on s'arrête pour les caractéristiques utilisées dans

la définition des états-repères. Nous reviendrons bientôt sur ce point important.

Il est utile de noter ici qu'il revient au même de dire que les interactions ou les relations à l'intérieur d'un système expriment les conditions de passage des éléments d'un état-repère à un autre, ou qu'elles rendent compte des contraintes imposées aux éléments pour ces divers passages. Les deux énoncés sont en réalité complémentaires, et par conséquent équivalents puisqu'il est possible de retrouver l'un à partir de l'autre. C'est en définitive le but que l'on se fixe dans la théorie envisagée qui décidera du choix de l'un ou de l'autre énoncé, le premier étant mieux adapté à l'étude de la cinétique du système, le second convenant mieux à l'étude des conditions de stabilité des états d'équilibre.

Nous voyons maintenant comment apparaîtra un système, dans le cas le plus général, et sous la forme abstraite qui le représentera dans l'étude théorique. Il sera constitué d'un certain nombre d'états-repères reliés entre eux par des relations qui expriment l'interdépendance de ces états, cette interdépendance étant la conséquence des interactions auxquelles participent les éléments du système. La concordance entre le système réel et le système abstrait qui le représente dans la théorie pourra être plus ou moins grande selon les choix retenus pour la détermination du modèle théorique de base. La confrontation entre les observations expérimentales effectuées sur le système réel, d'une part, et les résultats déduits de la théorie élaborée sur le système abstrait, d'autre part, aura précisément pour but d'évaluer cette adéquation de l'un à l'autre. Mais il faut dire dès maintenant que l'établissement d'une théorie ne correspond pas forcément, dans tous les cas, à la recherche de l'adéquation maximum, qualitative et quantitative. Il est parfois intéressant de limiter volontairement cette adéquation à certaines caractéristiques du système réel, afin de dégager plus clairement les propriétés communes à une catégorie plus ou moins vaste de systèmes. C'est même là que réside la différence essentielle entre la théorie d'un système et la théorie des systèmes, ainsi que nous le verrons de manière plus explicite au chapitre V. Il était cependant nécessaire de signaler déjà ce point, car il est étroitement lié au problème que nous allons aborder maintenant et qui a trait à la répartition des caractéristiques d'un système entre les définitions des états-repères et des interactions.

Parmi l'ensemble des caractéristiques nécessaires à l'étude d'un système, certaines apparaissent liées de manière évidente à la définition des éléments, d'autres au contraire ne semblent attribuables qu'au système considéré dans son ensemble, d'autres enfin peuvent apparemment être associées aussi bien à des définitions d'éléments qu'à des caractéristiques d'ensemble du système. Nous avons déjà rencontré, à propos de la définition des éléments, cet aspect au moins partiellement conventionnel de la répartition des caractéristiques d'un système en caractéristiques intrinsèques et en caractéristiques extrinsèques. Cette situation se retrouve évidemment à propos des

relations d'interaction puisqu'une caractéristique quelconque, nécessaire à l'étude du système, devra en définitive être attribuée aux états-repères ou aux relations entre états-repères, l'ensemble de ces données définissant complètement le système. Mais il est nécessaire de faire une distinction entre ces deux types de données, car leurs rôles respectifs ne sont pas symétriques. En effet, les états-repères sont entièrement définis par les caractéristiques intrinsèques qui leur sont attribuées. En revanche, les relations entre états-repères, résultant des interactions entre les éléments, dépendront à la fois des caractéristiques intrinsèques des éléments en cause et des caractéristiques considérées comme extrinsèques.

Il est utile de voir sur un exemple concret comment se présente en réalité ce problème. Supposons que l'on veuille étudier le comportement d'un système constitué d'un certain nombre de molécules diverses contenues dans un récipient donné. La première question est de savoir à quel niveau on désire situer la théorie, puis quelles sont les caractéristiques que l'on suppose jouer un rôle à ce niveau dans les phénomènes dont on veut rendre compte. Le choix des caractéristiques utiles comporte une part d'hypothèses, mais il est bien entendu guidé par les connaissances expérimentales et théoriques acquises antérieurement. Ainsi que nous le verrons à propos de la théorie des systèmes, il est possible de réduire considérablement le caractère hypothétique du choix des caractéristiques significatives, en se plaçant à un niveau d'observation convenable où les connaissances acquises ont été abondamment prouvées.

Pour revenir à notre exemple, supposons que l'on veuille rendre compte du comportement des molécules au niveau individuel, et que l'on choisisse comme caractéristiques significatives les données suivantes :

- Composition des noyaux des atomes constituant la molécule.
- Nombre d'électrons appartenant à la molécule.
- Niveau énergétique de chaque électron dans la molécule.
- Situation de la molécule dans l'espace, et à chaque instant, par rapport à un référentiel donné.
- Composantes de la vitesse de translation de la molécule à chaque instant.

On pourrait évidemment, selon le raffinement de la théorie envisagée, ajouter encore à cette liste d'autres caractéristiques telles que les énergies de vibration et de rotation de la molécule, son moment magnétique, etc... Mais les données choisies ci-dessus sont suffisantes à titre d'illustration. Au niveau le plus fin compatible avec ce choix de caractéristiques, toutes celles-ci interviendront en tant que caractéristiques intrinsèques des éléments, et entreront par conséquent dans les définitions d'états-repères. Dans le cas présent, les états-repères ne seront pas définis uniquement en fonction de l'existence ou de l'absence de tel ou tel prédicat qualitatif, mais ils incluront

également les caractéristiques quantitatives associées aux prédicats qualitatifs. Ces caractéristiques quantitatives interviendront dans les définitions des états-repères, soit par des jeux de valeurs discrètes, soit par des gammes de valeurs à l'intérieur desquelles les paramètres considérés seront supposés pouvoir varier de manière continue. Le premier cas correspondra, par exemple, aux niveaux énergétiques des électrons dans la molécule, compte tenu des connaissances acquises sur la quantification de ces niveaux. Le second cas s'appliquera aux situations spatiales des molécules et aux composantes de leurs vitesses de translation. La question de savoir si une caractéristique quantitative doit être considérée comme susceptible de prendre seulement un certain nombre de valeurs discrètes, ou au contraire toute une série continue de valeurs, est très importante non seulement du point de vue de la validité des théories scientifiques, mais aussi parce qu'elle donne lieu à des extrapolations philosophiques souvent audacieuses. Il est donc nécessaire d'analyser en détail ce problème, mais cela ne pourra être tenté qu'au chapitre V, après avoir étudié les notions de structure et d'évolution. Pour le moment nous retiendrons seulement que, selon le caractère continu ou discontinu des variations que peut subir un paramètre qualitatif, le découpage de la gamme continue en sous-gammes plus ou moins étroites dans le premier cas, ou le nombre de valeurs discrètes retenues dans le second cas, dépendront dans une large mesure de la finesse de description recherchée. Le nombre d'états-repères constituant le fondement du modèle théorique est donc très étroitement lié à cet objectif.

Au niveau de description qui a été choisi jusqu'à présent, les caractéristiques devant être considérées comme extrinsèques sont évidemment en nombre très réduit. On y trouvera surtout le nombre d'éléments réels présents à chaque instant dans chacun des états-repères ou, pour employer une expression synonyme, dans chacune des classes-repères. Il s'agit bien là, en effet, d'une grandeur qui ne joue aucun rôle dans la définition des éléments et qui doit par conséquent être considérée comme une caractéristique du système. Ce nombre d'éléments, ou cardinal de la classe, joue d'ailleurs un rôle important dans la description du système à chaque instant. L'ensemble des cardinaux des différentes classes-repères constitue en effet une sorte de cliché instantané du système.

On peut considérer aussi que les référentiels d'espace et de temps font partie des caractéristiques extrinsèques. Mais il s'agit là de grandeurs qui n'interviendront en général que lorsque l'on voudra tenir compte d'un changement de référentiel, et qui par conséquent sont en marge du système proprement dit. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle nous avons vu au chapitre précédent que le terme de transformation, applicable en général à la disparition de prédicats qualitatifs c'est-à-dire à l'annulation des caractéristiques quantitatives qui leur sont associées, ne pouvait être utilisé sans réserves en ce qui concerne les coordonnées spatio-temporelles.

Enfin, d'autres données devront également être considérées comme

des caractéristiques extrinsèques. Il s'agit de celles qui correspondent à d'éventuelles actions extérieures auxquelles serait soumis le système considéré. Ces actions modifieront en général les conditions de passage des éléments dans les différents états-repères et interviendront par conséquent dans les fonctions d'interaction. Il se peut aussi que de telles actions extérieures jouent un rôle dans la définition des états-repères, en rendant possibles certains états qui ne peuvent être occupés qu'en présence de ces actions extérieures, ou au contraire en excluant d'autres états qui ne prennent de signification réelle qu'en l'absence de ces mêmes actions. Mais il faut remarquer que cette influence sur la définition des états-repères est en quelque sorte indirecte. L'existence de telle ou telle action extérieure conditionnera bien dans une certaine mesure le choix des états-repères, mais une fois ce choix fait les caractéristiques de l'action extérieure n'interviendront pas explicitement dans la définition des états-repères. La difficulté apparente vient du fait que les processus dont il faut tenir compte forment un cycle, et que la description que l'on en fait apparaît donc sous des angles différents selon le point de départ choisi. Si l'on part comme nous l'avons fait de la définition des états-repères, on constate aussitôt que la théorie du système ne pourra tenir compte que des relations entre les états choisis. Les interactions qui donneraient lieu à des états non retenus ne pourront être prises en compte. Il est donc nécessaire au moment du choix des états-repères, choix qui constitue la première étape et le fondement de la théorie projetée, de tenir compte déjà de toutes les interactions possibles. C'est là que réside la véritable difficulté, et cela montre bien l'importance de cette première démarche. On devra s'efforcer dans la plupart des cas de faire un choix d'états-repères aussi exhaustif que possible, en laissant à la théorie le soin de montrer ensuite que certains de ces états ne sont pratiquement pas, ou même pas du tout occupés. La difficulté qui vient d'être mentionnée sera d'autant plus grande que l'on cherchera à faire une théorie plus complète et plus précise, qualitativement et quantitativement, d'un système particulier. Elle s'estompera au contraire si l'on accepte de laisser indéfinis certains aspects de la théorie, comme par exemple le nombre exact d'états-repères. C'est d'ailleurs là l'un des intérêts majeurs de la théorie des systèmes, dans laquelle on est conduit effectivement à suivre cette voie.

Le système qui nous a servi d'exemple jusqu'ici peut maintenant être considéré d'une nouvelle manière si l'on accepte de modifier le niveau de description choisi. Si l'on ne cherche plus, par exemple, à rendre compte de la situation spatiale et de la vitesse instantanées de chaque molécule, ces grandeurs n'interviendront plus dans la définition des états-repères. Il suffira pour définir ces états de retenir uniquement la composition des molécules en noyaux d'atomes et en nombre d'électrons, et d'opérer une dernière discrimination compte tenu des niveaux énergétiques des différents électrons. Les grandeurs éliminées de la définition des états-repères se retrouveront bien entendu dans les fonctions d'interaction, c'est-à-dire en définitive dans les

relations entre les états-repères. Mais elles apparaîtront sous une forme nouvelle, moins différenciée que précédemment, puisqu'elles devront être alors valables au moins pour tous les éléments d'une même classe-repère. Autrement dit, les valeurs de ces paramètres qui seront introduites dans les fonctions d'interaction seront maintenant des valeurs moyennes. Cette notion de valeur moyenne peut d'ailleurs être diversement étendue, et correspondre par conséquent à différents niveaux d'intégration. Il s'agira toujours au moins d'une valeur moyenne applicable à tous les éléments d'une même classe-repère, compte tenu des caractéristiques qui ont été retenues pour la définition de cette classe, mais il pourra s'agir aussi d'une moyenne valable pour plusieurs classes ou même pour toutes les classes du système. Par exemple dans le cas du système moléculaire, et en ce qui concerne les vitesses des molécules, on pourra définir une valeur moyenne pour chaque classe-repère ou pour l'ensemble des classes.

L'introduction d'une valeur moyenne dans les fonctions d'interaction peut souvent se faire sous des formes différentes qui ne sont pas toutes aussi intéressantes ou avantageuses pour les objectifs de la théorie. C'est ici que doit intervenir la connaissance des lois qui régissent les interactions des éléments dans les processus les plus simples, c'est-à-dire dans les systèmes les plus simples où interviennent ces éléments. Le système moléculaire permet ici encore d'illustrer de manière concrète ces considérations dont la validité est très générale.

La vitesse moyenne des molécules, définie par classe-repère, est en général différente pour chacune des classes, et si l'on veut à partir de là définir une grandeur valable pour l'ensemble du système, il faudra opérer une seconde moyenne. Si au contraire on exprime la vitesse sous la forme d'énergie cinétique, c'est-à-dire sous une forme dérivée faisant intervenir, outre la vitesse, la caractéristique de masse comprise dans la définition des éléments, la moyenne par classe sera la même pour toutes les classes et se confondra par conséquent avec la moyenne pour tout le système. Mais cette manière particulière et souvent très utile de présenter les vitesses des éléments en termes d'énergies cinétiques est la conséquence de la connaissance préalable de la loi physique appelée « Principe d'équipartition de l'énergie ».

Il va de soi que toutes les caractéristiques d'un système ne sont pas au même titre susceptibles d'être introduites dans les fonctions d'interaction sous forme de moyennes, que ces moyennes soient relatives aux éléments d'une seule classe-repère, ou de plusieurs de ces classes, ou de toutes les classes du système. Faire intervenir une certaine caractéristique sous la forme d'une moyenne applicable à une classe-repère n'est légitime que si cette caractéristique joue le même rôle pour tous les éléments de cette classe et pour toutes les interactions auxquelles peuvent participer ces éléments dans l'ensemble du système. Pour reprendre l'exemple de la caractéristique de vitesse ou d'énergie cinétique dans le système moléculaire, on ne pourra faire intervenir cette caractéristique sous forme de moyenne applicable à toute une classe-repère que si elle intervient de la même

manière dans toutes les interactions auxquelles un élément quelconque de cette classe est susceptible de participer. Ce ne sera pas le cas s'il existe, par exemple, une ségrégation spatiale telle que certains éléments de la classe considérée peuvent intervenir dans certaines interactions alors que d'autres éléments de la même classe ne le peuvent pas. Il faudra alors subdiviser la classe en plusieurs sous-classes, de manière à ce que pour chacune de ces sous-classes les difficultés précédentes soient éliminées, ce qui conduira à ré-introduire les coordonnées spatiales en tant que caractéristiques intervenant dans la définition des états-repères. Par rapport à la classe initialement considérée, les nouveaux états-repères apparaîtront comme des sous-classes quantitatives relativement aux coordonnées spatiales, et elles correspondront à une division de l'espace en un certain nombre de zones.

On voit que toute transformation de caractéristiques intrinsèques en caractéristiques extrinsèques, ou inversement, peut entraîner une révision de la définition des états-repères, non seulement pour les caractéristiques que l'on veut explicitement transférer mais aussi pour celles qui leur sont plus ou moins directement liées. Le cas précédent était à cet égard particulièrement clair puisque les composantes de vitesse et les coordonnées spatiales sont reliées entre elles par l'intermédiaire du temps, les premières étant les dérivées des secondes par rapport à ce paramètre de temps. Mais il peut arriver pour de nombreux systèmes que la situation soit beaucoup moins évidente, et ce sera précisément le cas chaque fois que l'on ignorera ou que l'on connaîtra mal les relations de dépendance qui peuvent exister entre certaines caractéristiques introduites dans la description des éléments ou du système.

Tout ceci montre bien, une nouvelle fois, l'importance du modèle de base auquel on s'arrête pour l'élaboration d'une théorie, c'est-à-dire en définitive l'importance des choix opérés quant à la définition des états-repères d'où découle la répartition des caractéristiques en intrinsèques et extrinsèques. Nous savions déjà, et nous reverrons au chapitre V, que ces choix conditionnent le degré de généralité et la précision d'une théorie. Nous venons de voir maintenant qu'ils sont également très liés à la cohérence interne de la théorie. On peut même dire que toute incohérence, même apparemment mineure, décelée dans une théorie devrait conduire immédiatement à un réexamen approfondi de ces choix de base. Ce n'est pas souvent ce qui est fait, bien qu'il s'agisse là sans doute d'une des méthodes heuristiques les plus efficaces.

Il est maintenant possible de récapituler les données qui interviennent dans le modèle de base retenu pour l'établissement de la théorie d'un système quelconque. Ceci nous permettra, entre autres, de voir dans quelles grandes catégories peuvent se ranger les différents systèmes, et cette distinction sera utile lorsque nous aborderons les problèmes relatifs à la théorie générale des systèmes.

D'après ce qui précède, un système apparaîtra, d'une manière générale, comme un ensemble d'états-repères accompagné d'un

ensemble de relations exprimant les conditions dans lesquelles un élément réel du système est susceptible de passer d'un état-repère à un autre. Rappelons pour mémoire que l'on pourrait tout aussi bien dire, de façon complémentaire, que les relations expriment les contraintes qui s'opposent au transfert des éléments d'un état à un autre.

Schématiquement, un système peut donc être représenté comme l'indique la figure 1. E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 , représentent les états-repères. A chaque liaison fléchée correspond une fonction précisant dans quelles conditions un élément peut passer d'une classe à l'autre. Une fonction quelconque f_{ij} est relative au passage des éléments de la classe E_i à la classe E_j . Entre deux classes-repères il peut exister une seule liaison orientée dans un certain sens ou deux liaisons orientées en sens inverses.

Le nombre d'états-repères dépend, bien entendu, du système étudié et des choix que l'on fait pour la définition de ces états-repères.

Il est important de noter que le schéma adopté correspond à une représentation topologique et non pas à une représentation spatiale au sens habituel de ce terme. En particulier, la séparation des états-repères dans le schéma ne traduit pas obligatoirement l'existence de discontinuités entre ces états. Nous avons vu en effet que lorsque des caractéristiques quantitatives interviennent dans la définition des états-repères, elles peuvent être représentées par un ensemble de valeurs discrètes ou par une suite de valeurs continues. Tout dépend des choix auxquels on s'arrête pour l'établissement du modèle de base, et l'on sait que ces choix sont étroitement liés, d'une part aux connaissances antérieurement acquises, et d'autre part aux objectifs théoriques que l'on se fixe.

Dans l'exemple du système moléculaire, les situations énergétiques des électrons dans les diverses molécules correspondent à des caractéristiques quantitatives dont on ne retient qu'un certain nombre de valeurs discrètes, compte tenu des connaissances acquises sur la quantification de ces niveaux. En revanche les coordonnées spatiales des molécules sont des caractéristiques susceptibles de prendre une suite continue de valeurs et si l'on choisit de les retenir comme caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire intervenant dans la définition des états-repères, on aura un certain nombre d'états-repères contigus

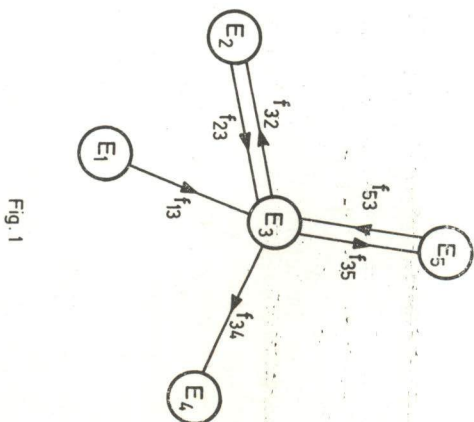


Fig. 1

relativement à ces caractéristiques, chacun de ces états correspondant à une gamme plus ou moins étroite de valeurs des coordonnées.

Un autre exemple simple serait celui du mouvement balistique d'un projectile dans l'espace, au voisinage de la Terre. On a dans ce cas un système composé seulement de deux éléments, le projectile et la Terre, mais sa représentation comportera un nombre infini d'états-repères. Les caractéristiques intervenant dans la définition de ces états-repères seront la masse m du projectile, les coordonnées x, y, z , de son centre de gravité, et les composantes de sa vitesse $dx/dt, dy/dt, dz/dt$. Les caractéristiques de la Terre ne serviront pas à définir à elles seules un état-repère, mais elles interviendront sous la forme du champ de gravitation en tant que caractéristiques extrinsèques dans les relations entre les états-repères du projectile. Les fonctions d'interaction destinées à expliciter ces relations combineront les caractéristiques intrinsèques et les caractéristiques extrinsèques du système en faisant intervenir la loi générale de la Dynamique, antérieurement connue. On remarquera enfin que si l'on ne cherche pas à faire une étude complète de la cinétique du système, mais seulement à connaître la cinématique du mouvement, c'est-à-dire la trajectoire suivie par le projectile dans l'espace, les composantes de vitesse disparaissent en tant que caractéristiques intrinsèques dans la définition des états-repères, mais elles continuent à être nécessaires en tant que caractéristiques extrinsèques. Cette situation n'est mentionnée ici qu'à titre d'illustration du lien qui existe toujours entre les objectifs d'une théorie et la répartition des caractéristiques du système en intrinsèques et extrinsèques. Ce principe général, d'un intérêt mineur dans le cas très simple qui vient d'être examiné, peut présenter une grande importance dans le cas de systèmes beaucoup plus complexes, et il est donc utile de l'avoir toujours présent à l'esprit.

Les exemples qui précèdent montrent bien, et il est nécessaire d'insister sur ce point, que les états-repères d'un système ne présentent *a priori* aucune correspondance simple et directe avec le nombre d'éléments réels que comporte le système. Il s'agit là d'une représentation de la notion de système beaucoup plus générale que celle qui consiste à faire correspondre à chaque élément réel un nœud du graphe représentatif. Cela résulte simplement du fait que la notion intuitive d'élément telle qu'elle apparaît dans une expression comme « élément réel » est loin d'être assez précise pour servir de fondement à une élaboration théorique rigoureuse, ainsi que nous l'avons vu abondamment à propos de la distinction entre caractéristiques intrinsèques et caractéristiques extrinsèques. Ce n'est que dans certains cas très particuliers qu'il sera possible de faire correspondre à chaque état-repère un et un seul « élément réel » du système. Il faudra pour cela que le système obéisse à la fois à un principe d'occupation précisant que chaque état-repère doit toujours être occupé, et à un principe d'exclusion spécifiant que chaque état-repère ne peut être occupé que par un seul élément à la fois. Le sens de cet énoncé très général,

applicable aussi bien aux systèmes abstraits qu'aux systèmes matériels, apparaît clairement si l'on prend comme exemple concret le système constitué par un certain nombre d'objets répartis dans l'espace à trois dimensions. La situation particulière qui vient d'être évoquée ne sera alors rencontrée que dans l'étude de l'état, ou de l'un des états, d'équilibre du système.

La représentation d'un système, telle qu'elle est donnée par la figure 1, ne correspond pas encore au cas le plus général. Ce graphe est en effet constitué de parties élémentaires telles que celle qui est représentée par la figure 2, ce qui signifie que les conditions de passage des éléments de la classe E_i à la classe E_j s'expriment par une relation qui ne fait intervenir au maximum que les caractéristiques intrinsèques de la classe E_i et les caractéristiques extrinsèques du système. Si f_{ij} exprime les conditions de passage, on aura :

$$f_{ij} = \xi(C_i, C_{ex})$$

ξ étant une fonction à préciser dans chaque cas, C_i représentant les caractéristiques intrinsèques de l'état-repère E_i , et C_{ex} les caractéristiques extrinsèques du système.

Fig. 2



Autrement dit, l'action que peuvent exercer les éléments du système sur un élément quelconque de la classe E_i , pour provoquer son passage dans une autre classe, est entièrement traduite à partir des caractéristiques considérées comme extrinsèques. Les éléments du système, autres que celui (ou que ceux) dont on considère le changement de classe, apparaissent donc comme indifférenciés vis-à-vis de celui-ci et en ce qui concerne leur action sur lui ; leur présence et leur rôle sont exprimés seulement par une action moyenne. Pour reprendre l'exemple du système moléculaire, on se trouvera dans cette situation lorsque les conditions de passage d'un élément de E_i vers E_j seront exprimables en fonction des caractéristiques de l'état-repère E_i et de la température, ce concept de température correspondant bien à une caractéristique extrinsèque au sens donné à ce mot dans les pages qui précèdent.

Un graphe élémentaire tel que celui de la figure 2, et les diverses combinaisons possibles de tels graphes, ne peuvent exprimer que les changements susceptibles de se produire à partir d'un ou de plusieurs éléments d'un même état-repère. On pourra représenter ainsi l'appartenance d'un ou plusieurs éléments appartenant à une même classe-repère. Par exemple, le schéma de la figure 2 exprime d'une manière générale la production d'éléments du type E_j à partir d'éléments du type E_i , mais sans rien préciser en ce qui concerne le nombre minimum d'éléments de E_i nécessaires pour obtenir ce changement, ni non plus en ce qui concerne le nombre d'éléments de E_j alors produits. Pour tenir compte de ces données, on peut affecter à la fonction f_{ij} un indice

inférieur (a) et un indice supérieur (b) représentant ces nombres. Une fonction $[f_{ij}]_a^b$ signifiera donc que le passage considéré nécessite (a) éléments de la classe E_i et donne lieu à la production de (b) éléments de la classe E_j ; elle exprimera donc un changement de la forme :

$$a(E_i) \rightarrow b(E_j)$$

On remarquera que lorsque (a) est différent de 1, une telle transformation peut en principe être décomposée en deux étapes successives si l'on prend soin de définir une classe-repère $E_{i'}$ comme correspondant à l'association de (a) éléments de la classe E_i . Dans ce cas, on obtiendra un élément de la classe $E_{i'}$ chaque fois que (a) éléments de la classe E_i seront associés d'une certaine manière, c'est-à-dire d'une manière susceptible de conduire à la production de (b) éléments de E_j . La fonction $[f_{ij}]_a^b$ sera alors remplacée par deux fonctions, $[f_{i'i}]_a^1$ et $[f_{ij}]_1^b$ et le graphe représentatif se transformera comme il est indiqué par la figure 3.



Fig. 3

Le terme « association » employé pour exprimer l'état des éléments de E_i dans la classe $E_{i'}$ ne doit pas être pris dans un sens trop particulier, comme un groupement dans l'espace par exemple. Il peut s'agir parfois de cela, mais dans le cas le plus général l'association signifie simplement que (a) éléments de E_i doivent obéir à certaines relations réciproques pour donner naissance à la transformation considérée. Ces relations touchent évidemment à des caractéristiques qui, dans le cadre du premier schéma, ne sont pas incluses dans la définition de l'état-repère E_i puisque, par principe même, cette définition ne contient aucune donnée permettant de distinguer certains sous-ensembles d'éléments qui se différencieraient des autres éléments de la classe à un titre ou à un autre. Une définition d'état-repère ne contient en effet, comme nous l'avons vu, que les caractéristiques

permettant d'identifier les éléments c'est-à-dire permettant de repérer ce par quoi ils sont identiques. L'introduction d'une nouvelle classe-repère $E_{i'}$, comme dans le second schéma de la figure 3, revient donc en réalité à subdiviser la classe E_i du schéma précédent en deux sous-classes E_i et $E_{i'}$ en tenant compte cette fois de caractéristiques qui n'étaient pas auparavant incluses dans la définition de E_i , et qui sont précisément les caractéristiques auxquelles se rapporte le terme « association ». Par exemple, si l'état $E_{i'}$ correspond à un regroupement dans l'espace de (a) éléments à l'intérieur d'un élément de volume de rayon maximum ρ , les éléments de E_i obéissant à cette condition se trouveront dans la classe $E_{i'}$. Dans ce cas, ce sont les autres se trouveront dans la classe E_i . Dans ce cas, ce sont les distances relatives des éléments dans l'espace, c'est-à-dire les coordonnées spatiales, qui constituent les caractéristiques d'association. Ces caractéristiques, considérées comme extrinsèques dans le premier schéma, deviennent intrinsèques dans le second schéma. Nous constatons ici, une nouvelle fois, l'importance de la distinction entre caractéristiques intrinsèques et caractéristiques extrinsèques, et son lien étroit avec la définition des états-repères. L'intérêt de cette constatation apparaîtra plus clairement encore lorsque nous étudierons la notion de structure.

Les schémas précédents n'expriment que les changements donnant naissance à des éléments d'une seule classe. L'extension aux cas où il y a, toujours à partir des éléments d'une même classe, production d'éléments appartenant à plusieurs classes différentes, est facile. Par exemple, si (a) éléments de E_i donnent respectivement (b), (c), (d) éléments de E_j , E_k , E_l on obtiendra, compte tenu des considérations qui précèdent, l'un des deux graphes de la figure 4. Le premier correspond au cas où $a = 1$; un seul élément de E_i donne naissance

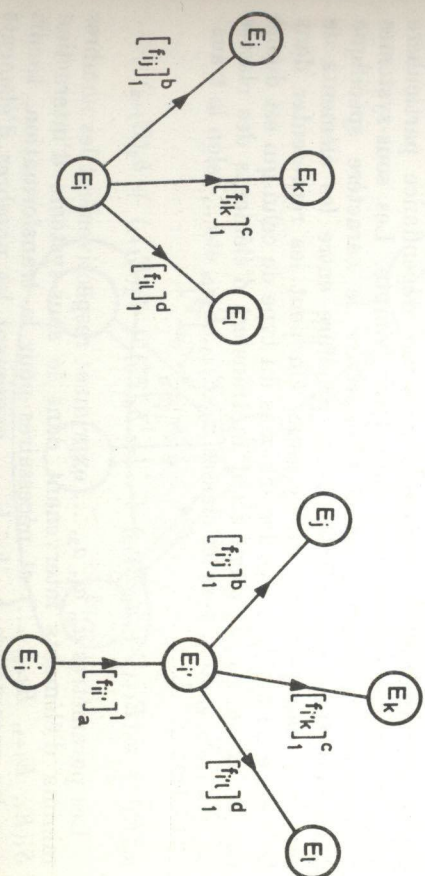


Fig. 4

à (b), (c), (d) éléments de E_j , E_k , E_l . Le second correspond au cas où (a) est différent de 1 ; il est alors nécessaire de tenir compte de « l'association » des (a) éléments de E_i préalable à la production des éléments de E_j , E_k , E_l .

Et puisque les différentes transformations ne sont pas indépendantes, on aura en outre dans le cas présent :

$$f_{ij} = f_{ik} = f_{il} = f_i$$

f_i représentant la probabilité de la transformation globale :

$$a(E_i) \rightarrow b(E_j) + c(E_k) + d(E_l)$$

Les graphes qui ont été considérés jusqu'à présent peuvent être dits *graphes élémentaires* (correspondant à des *systèmes élémentaires*), en ce sens que les fonctions issues d'une classe quelconque ne dépendent que des caractéristiques de cette classe et des caractéristiques extrinsèques du système. Dans de nombreux systèmes cependant, les conditions de transfert des éléments entre les classes-repères correspondent à des processus beaucoup plus complexes qui font intervenir les caractéristiques de plusieurs classes-repères. Il est alors nécessaire de considérer des ensembles de classes que l'on peut appeler des *sous-systèmes d'interaction*. Supposons par exemple que les éléments d'une classe E_i ne puissent quitter cette classe qu'à la faveur d'une interaction particulière avec des éléments des classes E_{i+1} , E_{i+2} , etc... Cela signifie que les conditions de transfert des éléments de E_i dépendent à la fois des caractéristiques intrinsèques de E_i , de celles de E_{i+1} , de celles de E_{i+2} , etc..., et aussi, dans le cas le plus général, des caractéristiques extrinsèques du système. On devra donc considérer que la dépendance entre les classes E_i , E_{i+1} , E_{i+2} ... n'est plus une dépendance globale exprimable par les seules caractéristiques extrinsèques du système, mais une dépendance particulière dont le graphe représentatif doit tenir compte. Les sous-systèmes d'interaction permettent donc d'exprimer le caractère spécifique des interactions susceptibles de se produire entre les éléments de certaines classes-repères du système. On peut les représenter dans le graphe du système par des schémas du type de celui qui est donné par la figure 5-1. Il s'agit ici d'un transfert d'éléments des classes E_i , E_{i+1} , E_{i+2} , etc... vers les classes E_j , E_{j+1} , E_{j+2} , etc..., selon la transformation :

$$a_0(E_i) + a_1(E_{i+1}) + a_2(E_{i+2}) + \dots \rightarrow b_0(E_j) + b_1(E_{j+1}) + b_2(E_{j+2}) + \dots$$

Les paramètres a_0 , a_1 , a_2 , ... expriment respectivement les nombres minima d'éléments intervenant dans le sous-système d'interaction $S_i(E_i, E_{i+1}, E_{i+2}, \dots)$ et nécessaires pour la transformation, tandis que les paramètres b_0 , b_1 , b_2 , ... expriment les nombres d'éléments de E_j , E_{j+1} , E_{j+2} , ... produits comme résultat de la transformation. La figure 5-1 correspond au cas où les éléments produits ne consti-

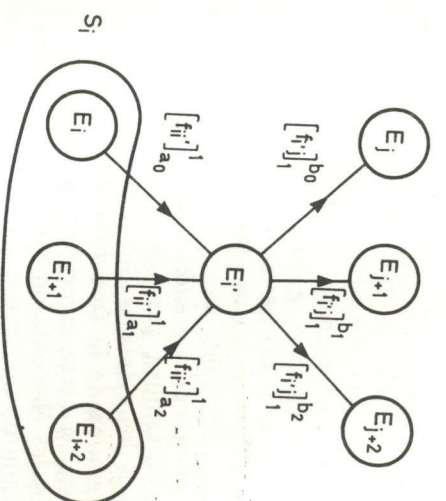


Fig. 5-1

tuent pas un sous-système d'interaction, c'est-à-dire au cas où les éléments des classes E_j , E_{j+1} , E_{j+2} ... ne sont pas susceptibles d'interactions spécifiques. La figure 5-2, au contraire, correspond au cas où les classes E_j , E_{j+1} , E_{j+2} ... forment encore un sous-système d'interaction S_j susceptible par exemple de redonner naissance aux éléments du sous-système S_i comme il est indiqué sur cette figure.

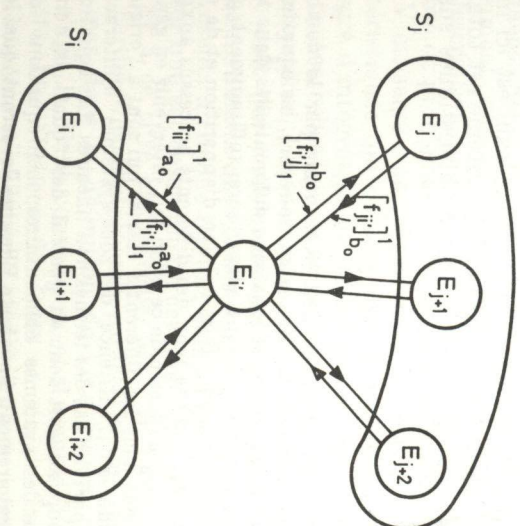


Fig. 5-2

Les graphes comportant des sous-systèmes d'interaction peuvent être dits *graphes composés*, correspondant à des *systèmes composés* (*).

Au cours des pages qui précèdent le problème de la répartition des caractéristiques d'un système en caractéristiques intrinsèques et en caractéristiques extrinsèques a été abondamment discuté. Cette répartition peut en définitive se traduire comme un compromis entre deux démarches inverses. Considérer qu'une caractéristique est extrinsèque revient en réalité dans la plupart des cas à remplacer les différentes valeurs que peut prendre cette caractéristique pour chaque élément pris en particulier, par une valeur moyenne que l'on admet valable pour tous les éléments du système. Il s'agit donc ici d'un processus d'*intégration* de la caractéristique dans l'ensemble du système. A la limite, si cette caractéristique a effectivement la même valeur pour tous les éléments du système, le processus d'intégration acquiert une validité rigoureuse alors qu'il ne constitue dans les autres cas qu'une approximation plus ou moins légitime ou précise. A l'inverse, considérer qu'une caractéristique est intrinsèque, c'est-à-dire l'introduire avec des valeurs particulières dans la définition de chaque classe-repère, c'est opérer une *différenciation* de cette caractéristique.

On pourra donc dire qu'un système est plus ou moins intégré, ou plus ou moins différencié, selon que le modèle choisi pour son étude exprime un plus grand nombre de caractéristiques sous forme extrinsèque ou sous forme intrinsèque.

Pour plus de précision, on dira qu'un *système est semi-différencié* si toutes les caractéristiques nécessaires à son étude sont incluses dans les définitions des états-repères. Le préfixe semi est ici important car on ne peut que très rarement dire qu'un système est totalement différencié. En effet des qu'existent des caractéristiques susceptibles de

(*) L'évolution d'un système étant exprimable par le nombre d'éléments présents à chaque instant dans chaque classe-repère, les équations d'évolution du système prendront la forme d'équations différentielles dans tous les cas où le nombre d'éléments dans chaque classe sera suffisamment grand. Chaque équation différentielle exprime alors le bilan d'apparition et de disparition des éléments d'une classe, compte tenu des différents processus auxquels sont soumis ces éléments. Chaque terme de ce bilan fait intervenir en général le nombre d'éléments contenus dans les différentes classes qui sont à l'origine de la transformation considérée. L'existence de sous-systèmes d'interaction introduit donc dans la plupart des cas des termes non linéaires. Les équations d'évolution des systèmes composés sont donc en général des équations non linéaires. En ce qui concerne les systèmes élémentaires, les équations d'évolution ne seront pas obligatoirement linéaires. Elles ne le seront que lorsque chaque transformation se produira à partir d'un seul élément d'une classe donnée. Les transformations nécessitant plusieurs éléments d'une classe donnée feront apparaître des termes non-linéaires.

varier de manière continue, la différenciation complète exigerait la définition d'un nombre infini d'états-repères, ce que l'on ne réalise jamais dans l'étude d'un système. On est conduit en pratique à une subdivision en un nombre fini de classes et de sous-classes, chaque sous-classe correspondant à des gammes finies de valeurs des caractéristiques susceptibles de varier de manière continue. A chaque sous-classe est donc attribué en réalité un jeu de valeurs moyennes pour ces caractéristiques à variation continue. L'introduction de toutes les caractéristiques d'un système dans les définitions d'états-repères est donc bien une condition nécessaire à la différenciation, mais elle ne devient une condition suffisante que dans le cas particulier où toutes les caractéristiques quantitatives ne sont susceptibles de prendre qu'une série de valeurs discrètes, et où à chacune de ces valeurs discrètes on fait correspondre une classe-repère. C'est seulement dans ce cas que l'on peut parler de *système totalement différencié*.

De la même façon, on dira qu'un *système est semi-intégré* si certaines caractéristiques ne sont pas incluses dans les définitions des états-repères, mais interviennent en tant que caractéristiques extrinsèques. Le préfixe semi est encore ici justifié car un *système totalement intégré* constitue un cas limite où s'évanouit la notion même de système. Cette notion correspond en effet au cas où toutes les caractéristiques du système sont considérées comme extrinsèques. L'absence de caractéristiques intrinsèques entraînant l'absence de classes-repères, le système se réduit donc à un seul élément. Ce concept limite de système totalement intégré est cependant intéressant et utile, car il constitue la frontière commune entre la notion de système et la notion d'élément. Selon les théories envisagées cette frontière peut être différemment située, et elle dépend toujours étroitement du niveau de description choisi. Ce point important, qui soulève un certain nombre de problèmes très fondamentaux, sera étudié en détail au chapitre V consacré à la théorie des systèmes.

Les caractéristiques qui doivent être prises en considération pour évaluer le degré d'intégration ou de différenciation d'un système sont en principe toutes celles qui sont nécessaires à l'étude du comportement de ce système. L'une d'entre elles cependant joue un rôle très particulier et doit par conséquent être traitée à part. Il s'agit de l'ensemble des cardinaux des classes-repères, c'est-à-dire des nombres d'éléments présents à chaque instant dans chacune de ces classes. On peut considérer que cet ensemble de cardinaux est une caractéristique du système, et à ce titre extrinsèque. Mais on peut aussi admettre que chaque cardinal constitue une caractéristique de classe, bien qu'il n'entre pas dans la définition de l'état-repère correspondant. En réalité il s'agit là d'une convention, et il semble bien que la première soit préférable à la seconde. Dans ce cas, on devra corriger la définition du système semi-intégré et dire qu'un système est semi-intégré si certaines caractéristiques, autres que les *cardinaux des classes-repères*, ne sont pas incluses dans les définitions des états-repères mais interviennent en tant que caractéristiques extrinsèques ».

Le fait que l'évolution d'un système soit le plus naturellement décrite par l'ensemble des cardinaux des classes-repères à chaque instant, n'est évidemment pas étranger au rôle particulier qui vient d'être évoqué à propos de ces grands. Leur situation frontière entre les caractéristiques extrinsèques et les caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire en définitive entre la notion de système et la notion d'élément, rend compte de ce rôle particulier.

CHAPITRE II

LA NOTION DE STRUCTURE

Le mot « structure », bien que très fréquemment utilisé dans des domaines divers, est entaché d'un vice fondamental qui rend son emploi délicat dans le cadre d'une théorie rigoureuse. Les différentes définitions qui en ont été données sont en effet trop imprécises pour permettre une formalisation univoque ; elles se prêtent à des acceptions variées, entraînant ainsi des confusions ou des ambiguïtés qu'il est souvent bien difficile de lever. La seule exception à cet état de fait concerne la définition mathématique de la structure, mais ce concept précis ne peut malheureusement pas être utilisé tel quel dans tous les cas, et dans tous les aspects de l'étude d'un système quelconque, ainsi que nous le verrons plus loin.

Avant d'examiner ce que devrait contenir toute définition rigoureuse de la notion de structure, il est utile de voir d'abord en quoi les définitions habituellement données sont insuffisantes ou ambiguës, puis de revenir ensuite sur la notion de système afin de la préciser et de la généraliser.

Parmi les diverses acceptions qu'admet Littré, on peut retenir surtout « la manière dont un édifice est bâti », ainsi que pour un corps vivant « animal ou végétal, l'arrangement des diverses parties de ce corps », ou encore en langage anatomique « mode d'arrangement qui appartient aux corps organisés, et grâce auquel ils sont composés de parties élémentaires multiples et diverses par leur nature », ou enfin pour un discours ou une phrase « la disposition, l'arrangement des parties de ce discours ou de cette phrase ». Dans ces définitions la structure correspond donc, d'une manière générale, à la disposition ou au mode d'arrangement des parties d'un Tout, ce Tout dont on distingue des parties reliées entre elles correspondant bien lui-même à la notion de système. Ainsi définie, la notion de structure ne prend en compte que les relations entre les parties du système, parties dont elle ne dit rien si ce n'est la simple affirmation de leur existence. Seule la troisième définition, que Littré réserve d'ailleurs au langage de l'anatomie, ajoute quelque chose sur ce point puisqu'elle dit que ces parties sont « diverses par leur nature ». Cette adjonction, pour imprécise qu'elle soit, n'en est pas moins significative car elle laisse déjà apparaître le flottement que l'on rencontre toujours dans les définitions du concept de structure dès qu'il s'agit de préciser les rôles res-

pectifs que doivent y tenir les objets du système et les relations entre ces objets. Mais il est utile, avant d'aborder ce point, de ne retenir pour le moment que les définitions introduisant seulement les relations entre les parties, c'est-à-dire entre les éléments, du système. Nous y verrons déjà la nécessité d'une précision.

Le contenu général que nous avons reconnu dans les diverses acceptions admises par Littré résulte en réalité d'une généralisation par induction puisque cet auteur attribue chacune de ses définitions à un domaine bien particulier de connaissance. Mais il s'agit là d'une induction tout à fait légitime, compte tenu de l'évolution de l'usage du mot « structure » au cours des dernières décennies. Le Larousse tient d'ailleurs compte de cette évolution puisque sa définition générale de ce mot est la suivante : « manière dont un édifice est construit, dont une chose est disposée, arrangée. *Manière dont les parties d'un tout sont arrangées entre elles* ».

Le Larousse introduit en outre dans une de ses définitions particulières du mot « structure » un terme qui ne peut être passé ici sous silence, celui de « forme ». Voici cette définition particulière du mot structure sous la rubrique Psychologie : « Ensemble organique de formes qui, selon certains psychologues, serait perçu d'emblée avant que chaque détail soit isolé (voir Forme). » Et à la définition du mot « forme », toujours sous la rubrique Psychologie, on trouve ceci : « Théorie de la forme, théorie qui considère la perception d'ensembles, de structures organisées, avant la perception des détails, et qui affirme dans tous les domaines l'influence du tout sur les parties qui le composent. » Dans le même dictionnaire, mais en tant que définition générale du mot « forme », on lit : « Manière d'être extérieure, configuration des corps, des objets », ce qui est très voisin de la première partie de la définition générale du mot « structure » donnée par le même ouvrage et rappelée ci-dessus. Une définition presque identique est donnée au mot « forme » par Littré, mais cette fois en tant que définition particulière : « En un sens restreint, l'apparence extérieure sous laquelle un corps se montre à nos yeux. » L'utilisation du mot « structure » pour définir le mot « forme » apparaît également chez Littré, mais cette fois il est vrai à propos d'une acception très particulière : « Dans les chapeaux de femme, carcasse en calicot gommé ou en tulle, latonnée au bord, sur laquelle se tend l'étoffe du chapeau et qui lui donne sa structure. » Ce dernier exemple ne présenterait pas d'intérêt pour nous s'il ne montrait que, même chez un maître de la langue comme le fut Littré, l'emploi de l'un des deux mots en cause entraîne tôt ou tard l'emploi de l'autre, ce qui révèle un voisinage de sens très grand.

Toujours chez Littré, et parmi les définitions les plus générales du mot « forme », on peut retenir surtout : « L'ensemble des qualités d'un être, ce qui détermine la matière à être telle ou telle chose », ou encore « principe distinct qui donne une manière d'être aux choses, qui leur donne leurs attributs », cette dernière définition étant essentiellement celle d'Aristote et des scolastiques. Ces définitions de la

« forme » présentent un caractère de généralité aussi grand que celui qui apparaît dans la définition de la « structure » donnée par le Larousse et rappelée à la fin du paragraphe précédent (« Manière dont les parties d'un tout sont arrangées entre elles »). Mais il y a entre ces définitions une différence, celle de la « structure » correspondant à une description du système considéré en soi, tandis que celles de la « forme » correspondent en partie à la description du système et en partie à ses fonctions. Cette distinction est importante, et nous serons conduits à l'étudier en détail lors de l'analyse de la notion de fonction et de ce que l'on appelle les relations structure-fonction.

Le Dictionnaire de Lalande ne permet pas d'aboutir à des conclusions plus précises. Il donne comme première définition de la structure : « Disposition des parties qui forment un tout, par opposition à leurs fonctions », et cite à titre d'exemple particulier en Biologie l'opposition de la constitution anatomique et des phénomènes physiologiques. Si l'on peut à la rigueur séparer la description d'un système, considéré isolément, des fonctions qu'il remplit vis-à-vis d'autres systèmes, cela devient beaucoup moins compréhensible lorsqu'il s'agit de séparer la description d'un système des fonctions que remplissent les éléments qui le constituent. Ces fonctions interviennent en effet obligatoirement pour définir les classes-repères et les relations entre classes qui permettent de décrire le système. Ce point sera repris en détail à propos de la notion de fonction, mais ce qui a déjà été dit de la définition d'un système et de ses éléments constitutifs permet de concevoir qu'il en est bien ainsi. La définition qui vient d'être citée, malgré une précision apparemment plus grande que les précédentes, ajoute donc plutôt à la confusion. Elle ramène en outre le mot structure à quelque chose qui est très voisin du sens restreint de disposition spatiale. La seconde définition donnée à la structure par le même dictionnaire est la suivante : « En un sens spécial et nouveau, s'emploie au contraire pour désigner, par opposition à une simple combinaison d'éléments, un tout formé de phénomènes solitaires, tels que chacun dépend des autres et ne peut être ce qu'il est que dans et par sa relation avec eux. » Nous trouvons ici une définition qui est en fait celle du système, et qui fait ainsi disparaître ce que peut contenir de spécifique le terme structure. Cela est d'ailleurs confirmé par la définition que donne le même ouvrage au mot système : « Ensemble d'éléments, matériels ou non, qui dépendent réciproquement les uns des autres de manière à former un tout organisé. »

En ce qui concerne le mot « forme », le Dictionnaire de Lalande donne d'abord la signification restreinte correspondant à la disposition spatiale des éléments : « Figure géométrique constituée par les contours d'un objet ». Il cite ensuite, comme un sens métaphorique, une signification très large résultant de la tradition des philosophes scolastiques et qui a trait à la forme d'une opération de l'entendement ou d'un raisonnement, par opposition à sa matière ou contenu. Enfin, à propos de la théorie de la Forme, nous constatons d'une manière plus nette encore que chez Littré la réapparition du mot structure :

« Théorie de la forme — Elle consiste à considérer les phénomènes non plus comme une somme d'éléments qu'il s'agit avant tout d'isoler, d'analyser, de disséquer, mais comme des ensembles constituant des unités autonomes, manifestant une solidarité interne, et ayant des lois propres. Il s'ensuit que la manière d'être de chaque élément dépend de la structure de l'ensemble et des lois qui le régissent. »

Les rappels de définitions qui viennent d'être donnés mettent bien en évidence l'aspect flou des rapports de sens entre les termes « structure » et « forme », ce qui ne peut provenir que d'une définition trop imprécise de chacun de ces mots. Ils sont parfois confondus, parfois distingués, mais la distinction qui est alors faite découle surtout d'un choix arbitraire. En réalité on constate, très schématiquement, que les deux mots semblent avoir connu au cours du temps des évolutions inverses. Le mot « forme », qui possédait pour les philosophes anciens le sens très général qui a été rappelé, n'a plus guère de nos jours, en pratique, que son sens restreint de disposition spatiale des éléments d'un système. Au contraire, le mot « structure » était surtout employé jadis dans son sens restreint, très voisin de celui de disposition spatiale des éléments, alors qu'il est aujourd'hui beaucoup plus utilisé dans le sens très général des relations entre les éléments d'un système quelconque, abstrait ou matériel. Ce schéma de l'évolution des deux concepts est évidemment très grossier, et souffre de nombreuses exceptions. L'une des plus flagrantes et des plus actuelles concerne la Psychologie de la Forme, pour laquelle les termes « structure » et « forme » sont confondus dans leur sens restreint de disposition spatiale des éléments. La confusion a d'ailleurs été entérinée dès l'origine de cette discipline par la traduction du mot allemand « Gestalt » par le mot français « forme », alors qu'une traduction littérale eût exigé « structure », l'allemand possédant par ailleurs le mot « Form » équivalent à notre « forme ». Il faut reconnaître toutefois que l'objet même de la Psychologie de la Forme correspond bien au sens restreint de disposition spatiale des éléments, et que le terme « forme » dans son acception moderne lui convient donc mieux que le terme « structure ». Ceci montre bien que l'ambiguïté des deux concepts n'est pas un phénomène propre à la langue française.

Devant la situation confuse qui vient d'être décrite, il est nécessaire de faire un choix. Nous admettrons ici, et pour tout ce qui suit, que le terme « structure » sera pris dans son sens le plus général de « manière dont les parties d'un tout sont arrangées entre elles ». Il va de soi cependant que le mot « structure » est toujours relatif à un système, ou à une catégorie de systèmes, et que ce qu'il exprime dépend par conséquent du modèle théorique adopté pour l'étude de ces systèmes. Par exemple, si l'on considère un système dans lequel les définitions d'états-repères comportent les coordonnées spatiales, et que l'on s'intéresse uniquement aux relations entre les éléments quant à ces coordonnées spatiales, la structure du système étudié deviendra une structure au sens restreint.

En définitive, le mot « structure » sera donc utilisé pour désigner ce

qui exprime l'arrangement des éléments d'un système, dans le cadre du modèle théorique choisi pour l'étude de ce système. Le caractère de relativité du concept de structure par rapport au modèle théorique employé est évidemment une notion importante qu'il est bon de ne jamais perdre de vue. Il résulte d'ailleurs très clairement de l'analyse détaillée faite au chapitre précédent concernant le choix des paramètres utiles dans l'étude du système, selon la nature et la variété des phénomènes dont on veut rendre compte.

En ce qui concerne le mot « forme » nous admettrons, conformément à l'usage, que les expressions « forme au sens restreint » et « structure spatiale » sont synonymes. Nous laisserons de côté pour le moment la question de savoir dans quelle mesure les concepts de forme, au sens ancien et philosophique du mot, et de structure, au sens général admis ci-dessus, peuvent être confondus. Cette question ne pourra être élucidée qu'après avoir analysé la notion de fonction.

Le contenu qui vient d'être adopté ci-dessus pour le mot « structure » constitue en réalité un cadre général plutôt qu'une définition complète du concept. Si l'on veut que cette notion puisse être formalisée, afin d'être utilisable dans une théorie autrement que comme un repère vague, il est indispensable de la préciser beaucoup plus. C'est ce que nous tenterons de faire dans la dernière partie du présent chapitre. Mais il est nécessaire de faire auparavant un retour sur la notion de système, et de compléter ce qui en a été dit au chapitre I.

Le concept de système, tel que nous l'avons utilisé jusqu'à présent, correspond à la notion d'un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux. Les éléments, définis par un certain nombre de caractéristiques intrinsèques, sont supposés variables c'est-à-dire, conformément aux définitions adoptées, modifiables ou transformables selon que les variations qu'ils sont susceptibles de subir touchent seulement à la valeur de leurs caractéristiques quantitatives ou aussi à l'existence de leurs prédicats qualitatifs. Ainsi qu'il a déjà été dit, les raisons de cette distinction apparaîtront plus clairement lorsque nous étudierons la notion d'évolution.

Dans l'optique adoptée jusqu'ici, les interactions entre les éléments du système se traduisent par des conditions de transfert des éléments entre les diverses classes-repères, et ces conditions constituent en définitive les relations entre les classes-repères choisies pour l'étude du système. Il est légitime de se demander maintenant si cette manière de concevoir la notion de système est suffisamment générale, autrement dit si elle est applicable telle quelle à tous les systèmes que l'on est susceptible de rencontrer. Ce point aurait pu être éclairci en principe dès le chapitre I. Mais il a paru préférable d'attendre que la nécessité de cet éclaircissement se fasse plus impérieusement sentir. C'est bien ce qui se produit maintenant, après le premier examen de la notion de structure. Nous avons vu en effet qu'une structure est toujours relative à un système, et que l'on ne peut pas par conséquent parler d'une structure en soi, mais seulement de la structure d'un système ou d'une catégorie de systèmes. Le concept de système

doit donc être plus large que celui de structure, le premier doit inclure le second. Autrement dit, les données qui nous serviront à définir la structure devront être prises parmi les données servant à définir le système. A la limite, on pourrait tout au plus admettre que l'inclusion de la seconde notion dans la première tende vers l'identité. Cette identité est d'ailleurs admise implicitement dans de nombreux écrits où le mot structure est employé dans le sens de système.

Si l'on veut éviter toute incohérence au niveau des définitions générales, il est donc important de s'assurer que le concept de système, tel que nous l'avons utilisé jusqu'ici, est propre à inclure dans tous les cas celui de structure. Or, on constate à l'examen attentif des définitions, que celle de la structure met l'accent sur la notion d'*arrangement* des éléments, tandis que celle du système introduit la notion d'interaction entre les éléments. La première notion est nettement statique, surtout si on la compare à la seconde dont le caractère dynamique apparaît clairement. Ainsi le concept de système se prête parfaitement, *a priori*, aux considérations dynamiques. Mais il se prête aussi, *a fortiori*, aux considérations statiques puisqu'il suffit pour cela d'opérer par réduction, c'est-à-dire par élimination des données variables. La possibilité de cette réduction découle d'ailleurs immédiatement du fait que pour parler de changement il faut bien conserver quelque part un « résidu » statique permettant de définir la chose qui change. Les données dynamiques impliquent l'existence de données statiques, alors que l'inverse n'est pas vrai.

Au contraire du concept de système, celui de structure apparaît composé de données essentiellement statiques. L'inclusion du second concept dans le premier est donc bien respectée par les définitions générales adoptées.

Le fait que la structure apparaisse comme une donnée statique ne signifie pas qu'elle ne puisse subir aucun changement, ainsi que nous le verrons en analysant la notion d'évolution au niveau du système et au niveau de la structure. Mais avant que cette question soit étudiée en détail, il est possible, compte tenu de tout ce qui précède, de faire dès maintenant les remarques suivantes. Dans l'étude d'un système quelconque, la structure constitue en fait une sorte de filtre, ou plutôt de cache, que l'on pose sur la réalité afin de l'observer conformément aux choix initiaux qui ont été faits quant à la définition des éléments. On pourrait dire aussi que la structure est un référentiel imposé par les définitions et les axiomes de la théorie, et qui nous permet de « cadrer » les états instantanés du système tels qu'ils apparaissent dans la théorie choisie. Attribuer une structure à un système réel est toujours une démarche liée à notre manière de décrire et d'étudier ce système. On peut dire que, à l'intérieur d'une théorie donnée, la structure du système théorique reste fixe, mais on ne peut évidemment pas en dire autant de celle du système réel. La structure théorique constitue en quelque sorte un cadre exhaustif, compte tenu des définitions et des axiomes adoptés, et la structure du système réel peut recouvrir entièrement ou partiellement ce cadre.

Tout ceci découle déjà sans difficulté de l'analyse détaillée des opérations de définition des états-repères et des relations entre états-repères. Et cette question s'éclaircira encore lorsque, dépassant la définition générale de la structure, nous parviendrons à une définition plus précise de ce concept. Mais il est nécessaire auparavant d'examiner brièvement quels sont les différents types de systèmes possibles, et de s'assurer ainsi que la définition générale du système couvre bien toutes ces variantes.

Dans les systèmes que nous avons considérés jusqu'à présent, nous avons admis que les éléments étaient variables, c'est-à-dire que certaines de leurs caractéristiques étaient susceptibles de changements. Les variations possibles étaient tout à fait générales puisqu'elles comprenaient non seulement les changements, continus ou discontinus, des grandeurs liées aux caractéristiques quantitatives, mais aussi les éventuelles disparitions ou apparitions des prédicats qualitatifs. Devant un système à éléments variables l'attention se porte d'abord, tout naturellement, sur les variations qu'est susceptible de subir le système, c'est-à-dire sur l'étude de son comportement dynamique. Et c'est bien cet aspect des choses que nous avons surtout envisagé jusqu'ici. Mais il est également nécessaire, dans bien des cas, de prendre en considération les seules caractéristiques non variables du système, que celles-ci soient quantitatives ou qualitatives. A la limite, on peut avoir à étudier des systèmes ne comportant que des caractéristiques fixes. Dans ce cas, les relations entre les classes-repères du système ne sont évidemment plus de la même nature que celles que nous avons rencontrées jusqu'à présent et qui exprimaient les transferts d'éléments entre classes-repères. Les seules relations qui peuvent alors exister, et que nous n'avons pas encore mentionnées, sont celles qui sont définissables dans un système statique. Quelles sont-elles, et combien peut-il en exister, de natures différentes ? Autrement dit, quels sont les types de relations que l'on peut établir entre des éléments définis par un certain nombre de caractéristiques fixes ? La réponse est immédiate : on ne peut que comparer entre eux les éléments ; mais cette comparaison implique en fait, dans le cas le plus général, deux types d'opérations distinctes. On pourra, par exemple, classer les éléments en fonction de la valeur que prend pour chacun d'eux une certaine caractéristique quantitative dont le prédicat qualitatif sous-jacent est commun à tous les éléments considérés. Cette dernière condition est évidemment importante, car on ne peut comparer que ce qui est comparable. Le prédicat qualitatif commun constitue en quelque sorte le point fixe de la comparaison. S'il s'agit ensuite de classer les éléments selon la valeur de la caractéristique quantitative associée, le référentiel de classement sera celui des nombres. Les opérations de ce type reviennent à mettre en évidence ce que l'on appelle des relations d'ordre entre les éléments du système. Et l'on peut ainsi établir pour le système, ou pour différentes parties du système, autant de relations d'ordre que l'on pourra trouver de points de comparaison et de référentiels associés. On remar-

que toutefois que dans l'opération de comparaison telle qu'elle vient d'être décrite, une difficulté peut surgir. Ce genre d'opération ne peut en effet être mené à bien que si les objets de comparaison sont, soit identiques, soit distincts. Il pourra donc arriver que l'on ait à étudier les problèmes d'intersection ou de voisinage des caractéristiques des éléments. Ce second mode de comparaison correspond aux relations de nature topologique entre les éléments. L'analyse topologique d'un système permettra en définitive de donner un sens précis aux notions d'identité ou d'équivalence, de voisinage et de séparation. Nous avons d'ailleurs déjà rencontré un problème analogue, mais sous une forme un peu différente, en étudiant la définition des éléments et des classes-repères. Le groupement d'un certain nombre d'éléments dans une même classe-repère correspond à la reconnaissance d'une relation d'équivalence entre ces éléments. Et l'étude précise du voisinage ou de la continuité entre les classes-repères se présente de manière différente selon que les caractéristiques qui entrent dans leurs définitions sont susceptibles de varier de façon continue ou discrète.

Les exemples qui précèdent ne sont évidemment donnés qu'à titre d'illustration, afin de montrer que les opérations de comparaison que l'on peut faire sur les éléments d'un système fixe conduisent en réalité à deux types de relations entre ces éléments, les relations topologiques et les relations d'ordre.

Il reste un autre type de système à étudier. Jusqu'à présent nous avons considéré implicitement que les systèmes que nous étudions sont constitués d'éléments qui nous sont en quelque sorte imposés de l'extérieur. La définition des caractéristiques du système n'est donc pas une opération entièrement libre, où tous les choix seraient possibles. Même si une certaine marge de liberté subsiste dans ces choix, ainsi que nous l'avons vu, il n'en reste par moins que les caractéristiques adoptées et les assemblages et combinaisons que nous leur faisons subir dans les développements théoriques doivent conduire à des résultats conformes aux observations expérimentales. Bien entendu, les éléments du système qui nous est imposé peuvent être matériels ou abstraits. Un système moléculaire est un système matériel, un assemblage de mots dans une phrase courante est un système abstrait, mais dans les deux cas les éléments ne nous sont pas donnés avec un jeu de caractéristiques qui les définirait de manière complète et univoque. Il nous faut, par une série d'approximations, trouver une ou plusieurs définitions dont les conséquences dans le cadre des théories choisies s'avèrent conformes aux observations et aussi précises qu'elles. Le cas du système constitué par les mots d'une phrase est propre à nous ouvrir d'autres horizons, et ce n'est pas sans raison que l'expression « phrase courante » a été employée ci-dessus. Les mots du langage courant, dans leur grande majorité, sont en effet très loin d'avoir une signification dont le contenu puisse être enfermé dans une définition exhaustive, précise, et définitive. Nous en avons vu déjà plusieurs exemples. Chaque mot traîne avec lui, outre sa signification principale, toute une série de significations harmoniques

liées à sa longue histoire et aux usages multiples qui en sont faits, et il est pratiquement impossible d'effectuer un inventaire exhaustif de toutes ces caractéristiques. Il faut ajouter enfin, ce qui n'est pas le moins important, que le problème se complique encore du fait que chaque mot est défini à l'aide d'autres mots, processus qui entraîne encore une multiplication des significations secondaires. Nous touchons là d'ailleurs au problème très fondamental des définitions d'éléments, induites à partir de l'observation de systèmes particuliers auxquels participent ces éléments, et dont la validité pour l'étude d'autres systèmes n'est pas *a priori* évidente. Cette question sera examinée en détail dans le prochain chapitre.

Si l'ambiguïté provoquée par les significations harmoniques est mise à profit dans le langage poétique, le langage juridique et *a fortiori* le langage scientifique s'efforcent au contraire de l'éliminer le plus possible. C'est en suivant cette voie que l'on arrive à la limite aux langages dits formalisés, tels que ceux qui sont utilisés en logique et en mathématique. Les éléments peuvent alors être définis à volonté, à l'aide d'une ou de plusieurs caractéristiques, qualitatives ou quantitatives. Les systèmes ainsi créés pourront faire l'objet d'études analogues à celles que nous avons déjà rencontrées. En particulier, par les opérations de comparaison, on pourra s'efforcer de mettre en évidence des relations topologiques ou d'ordre entre les éléments. A la vérité, ces types de relations ont été d'abord mis en évidence sur des systèmes de ce genre, c'est-à-dire sur des systèmes mathématiques dont la simplicité permet une étude plus rigoureuse des propriétés fondamentales. On peut aussi, sur les éléments définis, réaliser des opérations de combinaisons entraînant des relations un peu analogues aux relations de transfert que nous avons rencontrées d'abord à propos des systèmes dont les éléments nous sont imposés avec toute leur complexité. Il est intéressant d'essayer de voir en quoi ces nouvelles opérations pourront différer de leurs semblables sur les systèmes qui nous sont imposés. On doit noter d'abord à ce sujet que dans un système dont les éléments sont définis à volonté, il est immédiatement concevable qu'un certain nombre de conditions restrictives, qui résulteraient auparavant de la nature même des systèmes étudiés, pourront ne pas intervenir. En d'autres termes nous sommes maintenant maîtres des définitions et des axiomes, alors que notre marge de liberté dans ce domaine est en général assez étroite pour les systèmes qui nous sont imposés. Un système mathématique est même entièrement fixé par ces définitions et ces axiomes. La théorie de ce système, c'est-à-dire la mise en évidence de ses diverses propriétés, n'introduit plus ensuite qu'un ensemble de règles logiques auxquelles doivent obéir les assemblages et combinaisons que l'on est amené à construire à partir des caractéristiques contenues dans les définitions et axiomes. On voit donc déjà que les différences qui pourront apparaître entre les systèmes que nous créons et les systèmes qui nous sont imposés, viendront surtout de la présence ou de l'absence de certaines conditions particulières imposées aux éléments ou

à leurs relations. Mais la question est pour nous de savoir si ces différences sont essentielles, c'est-à-dire en définitive si elles invalident ou non notre définition générale du système. On peut répondre dès maintenant par la négative car les opérations de combinaison dans ces systèmes correspondent bien à des relations de transfert entre éléments ou groupes d'éléments, comme dans les systèmes que nous avons déjà étudiés. Mais il est cependant utile d'examiner ce point sur un exemple simple afin de mieux voir sur quels aspects portent les différences entre les deux types de systèmes.

Considérons par exemple l'ensemble des nombres entiers naturels $[0, 1, 2, 3, \dots]$ et l'opération classique de l'addition. Les nombres constituent les éléments du système, et l'opération d'addition correspond aux relations entre les éléments. Quels que soient les nombres m et n choisis dans l'ensemble, on pourra toujours écrire :

$$m + n = p$$

p étant également un nombre appartenant à l'ensemble.

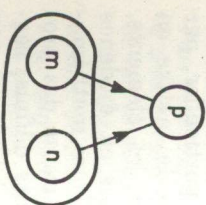


Fig. 6

Le système peut donc être représenté par une combinaison de graphes élémentaires analogues à celui qui est représenté sur la figure 6. Nous retrouvons un schéma semblable à ceux qui représentaient les opérations de transferts d'éléments dans les systèmes matériels. Le groupement des éléments m et n dans ce que nous avons appelé un sous-système d'interaction correspond ici à l'opération d'addition, alors que les groupements de ce type dans les systèmes concrets représentent des opérations d'association dont la nature dépend des éléments en présence et de leurs propriétés. Mais quel aux éléments de départ, donne naissance à l'élément d'arrivée. La seule différence vient du fait suivant. Dans un système concret, une telle opération fait disparaître un élément du type m et un élément du type n , et fait apparaître un élément du type p . Le nombre d'éléments contenus dans les classes m et n diminue d'une unité, tandis que le nombre d'éléments de la classe p augmente d'une unité. Au contraire, dans le système des nombres, il existe toujours un seul élément de chaque classe, un 0, un 1, un 2, ... Les opérations peuvent donc être considérées comme des opérations fictives, portant uniquement sur les classes-repères et non sur les éléments qu'elles contiennent. On pourrait tout aussi bien dire que dans ce genre de système chaque classe-repère comporte un nombre infini d'éléments, et les opérations pourraient alors être considérées comme correspondant effectivement à des transferts d'éléments entre les classes-repères. Il est toutefois plus satisfaisant de dire qu'en réalité ce sont les axiomes qui diffèrent dans les deux types de systèmes. Dans un système matériel, la nature même des éléments impose un axiome sur l'exis-

tence de ceux-ci. Dans un système abstrait, construit de toute pièce, un tel axiome peut très bien ne pas être pris en compte ou, si l'on préfère, il peut être remplacé par un autre axiome précisant au contraire que les opérations effectuées ne modifient pas le nombre d'éléments dans chacune des classes du système. Dans un système abstrait dont nous ne sommes pas entièrement maîtres, comme le langage courant, d'autres axiomes peuvent être appliqués, mais par suite des conditions particulières qui sont alors imposées par la pré-existence du système, ces axiomes seront sans doute en général plus voisins de ceux des systèmes matériels que de ceux des systèmes abstraits construits à volonté.

En définitive, il apparaît donc que dans un système quelconque, matériel ou abstrait, pré-existant ou volontairement construit, les relations entre les éléments peuvent appartenir à trois types fondamentaux : les relations topologiques, d'ordre, et de transfert. Nous retrouvons ainsi les types de relations que la Mathématique a mis en évidence sous le nom de structures mères : topologiques, d'ordre, et algébriques. Nous allons voir bientôt à quoi correspond exactement le mot « structure » dans cette acception mathématique. Les relations algébriques correspondent à ce que nous avons appelé les relations de transfert, la différence entre les deux termes exprimant essentiellement le fait que les axiomes d'existence des éléments ne sont pas les mêmes dans les systèmes mathématiques et dans les systèmes matériels.

La définition générale du système, telle qu'elle a été énoncée au chapitre I, peut donc être conservée, mais il est utile de préciser ce que recouvre exactement le terme d'interaction qu'elle contient. On aboutit ainsi à l'énoncé suivant :

Un système est un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux. Par application de règles d'équivalence aux définitions des éléments, ceux-ci peuvent être répartis dans un nombre fini ou infini de classes-repères. Les interactions entre les éléments se traduisent en définitive par des relations entre les classes-repères, et ces relations appartiennent à trois types fondamentaux : les relations topologiques, d'ordre et de transfert. A chaque système peuvent être associés des axiomes particuliers concernant les conditions d'existence des éléments.

Il est possible maintenant d'aborder la définition précise du concept de structure, dont nous savons déjà qu'elle doit être incluse dans la définition du système. Il faut donc pour cela partir de la définition générale et complète du système.

D'après ce qui a été vu jusqu'à présent, un système est entièrement défini par les données suivantes :

1. Affirmation d'existence des classes-repères.
2. Nombre de classes-repères.
3. Définition de chaque classe-repère, c'est-à-dire ensemble des caractéristiques intrinsèques qualitatives et quantitatives qui lui

correspondent. Définition des éventuelles caractéristiques extrinsèques du système.

4. Nombre d'éléments dans chaque classe-repère.

5. Axiomes d'existence des éléments dans les classes-repères.

6. Affirmation d'existence des relations entre classes-repères.

7. Type fondamental des relations entre classes-repères, et éventuellement axiomes particuliers. (Par exemple : relations algébriques de Groupe, relations d'ordre numérique, etc...)

8. Définition des relations entre classes-repères, c'est-à-dire assemblages des caractéristiques intrinsèques et extrinsèques qui expriment ces relations, et éventuellement des valeurs numériques correspondantes. (Ces définitions des relations peuvent être considérées comme des axiomes découlant des connaissances acquises antérieurement. Par exemple, dans un système matériel à relations de transfert, les assemblages de caractéristiques correspondent à l'expression des lois physiques qui permettent de connaître les conditions dans lesquelles un élément peut passer d'une classe dans une autre.)

Si l'on reprend la définition générale de la structure, comprise comme « arrangement entre les éléments d'un système », on voit immédiatement que parmi les données qui viennent d'être énumérées, ce sont surtout celles qui ont trait à l'existence et à la nature des relations entre éléments qui devront intervenir. La notion d'arrangement n'implique pas en effet d'autres précisions que celles qui touchent à l'existence ou la non-existence des relations, et à leur signification. Il faut noter cependant que l'affirmation d'existence d'une relation entre classes-repères, nécessite obligatoirement l'affirmation préalable de l'existence de ces classes-repères. En outre, dans un système qui n'est pas volontairement construit mais qui est imposé, la signification des relations entre éléments ne peut être déduite que de la nature de ces éléments, c'est-à-dire de leur définition.

On aboutit ainsi à une première définition de la structure, comportant les données 1, 2, 3, 6, 7. Nous l'appellerons la *structure totale du système théorique*. On retrouve bien ici l'aspect statique de la notion de structure, qui est un caractère lié aux choix définissant le cadre général adopté pour l'étude du système, ainsi que nous l'avons déjà vu.

On peut aussi parler de la *structure totale du système réel, dans le cadre théorique choisi*. Il faut pour cela tenir compte du fait que certaines classes-repères peuvent être vides, soit en permanence, soit par suite de changements se produisant dans le système. Par rapport à la définition précédente, cette nouvelle notion se traduit par l'adjonction d'une donnée supplémentaire correspondant à une forme particulière de la donnée 4 : classes-repères occupées par un nombre non nul d'éléments. La structure du système réel ne tient plus compte que des classes non vides et des relations entre elles. Dans un système où les classes occupées ne peuvent devenir vides, le rapport entre la

structure totale du système réel et la structure totale théorique reste toujours le même. Dans le cas contraire, ce rapport se modifie par suite des changements subis par la structure du système réel. Ce point sera repris en détail dans le chapitre consacré à l'Évolution.

Les définitions qui viennent d'être données sont applicables aussi bien aux systèmes matériels qu'aux systèmes abstraits, et que ces derniers soient construits ou imposés. Dans le cas des systèmes abstraits construits, il peut arriver cependant que les définitions et les axiomes choisis rendent inutile ou superflue l'introduction de certaines données dans la définition de la structure. On se trouve par exemple dans cette situation lorsque l'on cherche à étudier les seules propriétés générales d'un certain type de relations. Il n'est plus alors nécessaire de définir les éléments du système ; la simple affirmation de leur existence suffit. En d'autres termes, on admet seulement que ces éléments existent et qu'ils se prêtent aux relations qu'on leur impose et aux axiomes particuliers que l'on associe à ces relations. On en arrive ainsi à définir une structure ne contenant plus que les données 1, 6, 7. Nous l'appellerons la *structure relationnelle du système*. Sous cet aspect, la notion de structure est celle que l'on rencontre en Mathématique, tout au moins, comme il vient d'être dit, dans l'étude des propriétés générales des différents types de relations. C'est à partir de cette définition que l'on a pu dire que la notion de structure fait disparaître presque entièrement la notion d'élément. Ici en effet, les éléments ne sont plus présents que par une simple affirmation d'existence, et l'on ne se préoccupe plus des autres caractéristiques qui peuvent leur être attachées. En particulier, ce qui définit leur nature disparaît. Si la conclusion qui précède est légitime dans le cas des systèmes abstraits mathématiques que nous venons de considérer, il est abusif de l'étendre à la notion de structure en général, et pour tous les systèmes possibles. Nous verrons par exemple, dans le prochain chapitre, que le contenu du mot structure dans l'étude des relations structure-fonction ne correspond pas à la notion de structure relationnelle, mais à celle de structure totale où la nature des éléments conserve toute son importance.

La fluidité de la notion de structure, dans l'usage qui en est fait couramment, apparaît plus nettement encore si l'on examine de plus près ce que sont ses rapports avec la notion de système dans le cas des systèmes abstraits construits. Le contenu exhaustif de la notion de système, tel qu'il a été défini avec ses huit données, est en principe tout à fait général et valable pour un système quelconque, matériel ou abstrait, construit ou imposé. On peut imaginer la construction de systèmes abstraits très divers, pour chacun desquels on fixerait à volonté le contenu des huit données. Mais il se trouve en fait que les systèmes abstraits que l'on construit généralement obéissent à certaines règles particulières qui peuvent rendre inutiles ou indifférentes certaines des données de base. La définition générale du système contient en effet, à la fois des données relatives au système réel, et des données relatives à notre manière de décrire et d'étudier ce sys-

tème. Et ce regroupement est seul capable d'exprimer la connaissance totale du système réel. Mais si l'on cherche à étudier les seules propriétés générales du substratum théorique choisi, on est conduit à prendre en considération des systèmes de plus en plus généraux, c'est-à-dire de plus en plus pauvres en ce qui concerne le contenu de leur définition. C'est ainsi que les propriétés les plus générales d'un modèle théorique pourront être étudiées en prenant seulement en considération ce qui touche aux classes-repères et aux relations entre classes-repères, et en excluant ce qui a trait à l'existence et au nombre d'éléments réels contenus dans ces classes. Les données 4 et 5 deviennent ainsi inutiles pour la définition du système. On peut dire aussi, si l'on préfère, que les données 4 et 5 sont alors remplacées par l'un des axiomes suivants :

— Il existe toujours un et un seul élément dans chaque classe-repère, et les relations entre classes-repères n'entraînent aucun transfert réel d'éléments.

— Il existe toujours une infinité d'éléments dans chaque classe-repère, et les relations entre classes-repères peuvent être considérées comme entraînant des transferts réels d'éléments.

Ces deux axiomes sont d'ailleurs équivalents, comme nous l'avons déjà vu à propos de l'opération d'addition dans l'ensemble des nombres entiers naturels. En outre, le fait qu'ils soient applicables à tous les systèmes abstraits construits en pratique, rend leur énoncé inutile pour toute cette catégorie de systèmes, et les fait ainsi disparaître de la définition de ces systèmes.

Cette recherche des propriétés présentant un caractère de généralité de plus en plus grand peut évidemment aller beaucoup plus loin encore, et elle s'accompagne toujours d'un appauvrissement des données utilisées pour la définition des systèmes. Par exemple, dans l'étude d'un modèle physique théorique, il peut être intéressant à un certain niveau de généralité de conserver la donnée 8, relative aux assemblages de caractéristiques intrinsèques et extrinsèques intervenant dans la définition des relations entre classes-repères. On notera d'ailleurs que ces assemblages correspondent en fait à des relations plus ou moins variées entre les caractéristiques, et qu'ils introduisent par conséquent un certain nombre de sous-systèmes à l'intérieur du système principal que l'on étudie. A d'autres niveaux, et pour obtenir une plus grande généralité, la donnée 8 sera elle-même abandonnée. C'est ce qui se passe en mathématique, dans la recherche des propriétés de plus en plus fondamentales des systèmes, et cette démarche peut encore être poursuivie jusqu'à abandonner également les données 2 et 3. On aboutit ainsi, à la limite, à des systèmes qui ne sont plus définis que par les données 1, 6, 7, le degré de généralité de ces divers systèmes ne dépendant plus alors que de la pauvreté ou de la richesse des axiomes particuliers introduits dans la donnée 7. On constate donc qu'à la limite la notion de système et la notion de structure,

au sens que nous avons donné à l'expression « structure relationnelle », sont confondues. Cela est d'ailleurs normal puisque, la notion de structure devant être incluse dans la notion de système, l'appauvrissement de celle-ci doit tôt ou tard entraîner l'appauvrissement de celle-là, la limite extrême théorique étant naturellement la confusion des deux notions au niveau le plus pauvre et le plus général.

L'identité du contenu des notions de système et de structure en mathématique n'est pas limitée aux seuls niveaux les plus généraux, c'est-à-dire aux systèmes définis uniquement par les données 1, 6, 7. Cette assimilation semble s'étendre également aux systèmes définis par les données 1, 2, 6, 7, du moins si l'on en juge par certains aspects du langage employé. C'est ce que nous allons voir sur un exemple.

L'étude des propriétés les plus générales des systèmes dont les relations obéissent aux axiomes de Groupe (axiomes contenus dans la donnée 7) se fait sur un système défini par les seules données 1, 6, 7. Lorsqu'on parle alors de la structure de Groupe, le mot « structure » est bien pris dans le sens de « structure relationnelle » et son contenu est identique à celui du système qui est utilisé pour cette étude. Mais dans l'étude du même type de propriétés sur un système comportant un nombre fini n d'éléments, ou plutôt de classes-repères, on parle de « structure de groupe fini à n éléments », ce qui n'est légitime en toute rigueur que si l'on admet ici encore l'identité des notions de système et de structure. En effet, dans ce cas le système est défini par les données 1, 2, 6, 7, et si l'on conservait à la notion de structure sa signification la plus générale de « structure relationnelle » (données 1, 6, 7), il serait plus correct de parler de « système à n éléments présentant une structure de Groupe ». Il faut d'ailleurs reconnaître que l'expression « structure de groupe fini à n éléments » peut à la rigueur être comprise dans l'un ou l'autre sens. Mais dans l'étude des systèmes de ce type, l'utilisation de certaines notions comme l'isomorphisme (même forme = même structure), qui implique la prise en considération du nombre d'éléments des systèmes (donnée 2), montre bien que les concepts de système et de structure sont confondus. Admettre l'identité des deux notions est évidemment toujours possible à ce niveau, si l'on en fait la convention expresse, et à condition de ne pas en déduire que cette confusion restera valable à tous les autres niveaux. Considérons enfin l'étude des propriétés de Groupe dans l'ensemble des nombres entiers relatifs ($\dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 \dots$) muni de l'opération d'addition. Nous franchissons ici un nouveau pas dans la spécification du système, dans sa particularisation, ce système englobant maintenant dans sa définition les données 1, 2, 3, 6, 7, puisque les éléments ne sont plus quelconques mais sont au contraire parfaitement définis en tant que nombres entiers relatifs. La séparation entre les concepts de système et de structure commence à apparaître plus clairement. Il devient plus évident que deux concepts distincts sont maintenant utiles pour rendre compte, d'une part du caractère particulier du système étudié, et d'autre part des propriétés qu'on lui reconnaît et qui dépassent en généralité ce système parti-

culier. Notons au passage que la notion de structure apparaît ainsi, dès ce niveau, associée aux propriétés générales du système. Cette remarque sera reprise et approfondie lorsque nous étudierons la notion de fonction et les relations « structure-fonction ».

Il serait possible de définir encore d'autres concepts de structure, venant s'intercaler entre ceux de structure totale et de structure relationnelle. Ces deux concepts semblent bien en effet constituer des frontières pour la notion de structure. Avec moins de données que 1, 6, 7 (structure relationnelle), la notion même de système disparaît, et par conséquent aussi celle de structure qui lui est incluse. Avec plus de données que 1, 2, 3, 6, 7 (structure totale), on introduit des informations qui outrepassent le contenu intuitif de la notion de structure, considérée comme « arrangement des parties d'un système ».

Il est sans doute préférable de ne pas utiliser de tels concepts intermédiaires, afin de ne pas multiplier les risques de confusion dont on a vu qu'ils sont déjà très grands. En outre, ces nouveaux concepts n'apporteraient rien d'essentiel à la notion de structure.

En ne conservant que les deux concepts de structure totale et de structure relationnelle, l'usage de la notion de structure se présente en définitive de la manière suivante. Pour les systèmes définis par moins de données que 1, 2, 3, 6, 7, la structure à prendre en considération est la structure relationnelle. Pour les systèmes définis par les données 1, 2, 3, 6, 7, ou par un nombre supérieur de données, on peut avoir à considérer soit la structure relationnelle, soit la structure totale, selon l'objet de l'étude. C'est en étudiant la notion de fonction qu'apparaîtra toute l'importance du concept de structure totale.

En définitive, on retiendra que la notion de structure réduite à elle-même est trop vague pour que son utilisation n'entraîne pas inévitablement un certain nombre d'ambiguïtés. Mais il est possible de lui rattacher un certain nombre de concepts parfaitement définis, et par conséquent utilisables dans le cadre d'une théorie précise.

La confusion des concepts de système et de structure, légitime ou sans importance notable dans l'étude d'un certain nombre de systèmes abstraits construits, tels que ceux que l'on rencontre en mathématique, est à éviter d'une manière générale dans l'étude d'un système quelconque. Les propriétés du système et les propriétés de la structure peuvent en effet présenter des différences fondamentales, ainsi que cela apparaîtra clairement lorsque nous étudierons la notion d'évolution. Il est également indispensable de ne pas extrapoler sans précaution les propriétés relatives à la structure relationnelle d'un système abstrait, et cela surtout dans l'étude de systèmes très particuliers pour lesquels le concept de structure totale peut devoir être pris en considération.

On notera enfin que le concept de structure relationnelle est purement qualitatif. Le concept de structure totale contient au contraire des données quantitatives à variation discontinue, par les données 2 et peut-être 3, et même éventuellement des données quantitatives à variation continue, par la donnée 3.

CHAPITRE III

LA NOTION DE FONCTION

FONCTION D'UN ÉLÉMENT DANS UN SYSTÈME.

La notion de fonction d'un objet ou d'un élément quelconque est étroitement liée au comportement de cet élément et au rôle qu'il joue dans un environnement donné, cet environnement étant lui-même constitué d'éléments divers. La notion de fonction est donc inséparable de celle de système, et son explicitation ne peut guère se faire sans qu'interviennent à la fois les caractéristiques de l'élément considéré et les caractéristiques des autres éléments situés dans l'environnement. Parler des fonctions d'un élément, sans préciser à quel environnement elles se rapportent, est en toute rigueur un contresens. Cette approximation ne devient acceptable que s'il est par ailleurs établi que les fonctions dont il s'agit se retrouvent dans tous les systèmes auxquels l'élément est susceptible de participer. Mais il est à craindre que l'emploi trop fréquent de ce langage elliptique entraîne l'oubli de l'interdépendance fondamentale qui existe entre les notions de fonction et de système. La seule exception à cette règle correspond au cas des éléments qui se modifient indépendamment de leur environnement, c'est-à-dire aux changements dont on peut rendre compte à partir des seules caractéristiques intrinsèques de l'élément. On pourrait être tenté de classer ce comportement sous une rubrique de *propriétés intrinsèques* de l'élément, marquant ainsi une séparation avec la notion de fonction. Mais il est en définitive préférable d'inclure ce comportement particulier dans la notion de fonction, et comme cas limite, pour les raisons suivantes.

Une variation spontanée d'un élément, c'est-à-dire une variation ne dépendant que de ses caractéristiques intrinsèques, fait bien partie du comportement de celui-ci. Le seul problème est de savoir si cet élément joue un rôle vis-à-vis des autres éléments qui constituent son environnement, ou en d'autres termes si l'élément considéré et son environnement constituent effectivement un système. Or, le fait qu'un élément ne subisse que des variations spontanées ne permet pas de conclure que cet élément et son environnement sont indépendants. Cela signifie seulement que le comportement de l'élément ne dépend pas de son environnement, mais la relation inverse n'est pas exclue pour autant, et il est tout à fait possible que l'élément joue un rôle

dans le comportement des éléments de l'environnement. Il suffit en effet, pour qu'il y ait système, que l'élément considéré donne naissance par ses variations à des éléments occupant certaines classes-repères définies pour les éléments de l'environnement. Il y a alors existence de relations entre ces classes-repères et celle qu'occupait initialement l'élément, et par conséquent système. Un exemple classique de cette situation est donné par les chaînes de descendance, dans lesquelles une classe quelconque de descendants dépend des classes de tous ses ascendants, sans réciprocité. Puisque l'existence de variations spontanées dans un élément n'exclut pas *a priori* que celui-ci joue un rôle vis-à-vis de l'environnement, il est en définitive tout à fait logique d'inclure les propriétés intrinsèques dans la notion de fonction. Le cas où une variation spontanée ne se traduit pas par une fonction effective est ainsi rapporté aux propriétés de l'ensemble des éléments considérés, et dépend du fait que ceux-ci constituent ou non un véritable système.

D'après ce qui précède, les fonctions d'un élément dans un environnement donné sont exprimables à partir des caractéristiques intrinsèques de l'élément et, dans le cas le plus général, à partir des caractéristiques des éléments de l'environnement, y compris celles qui apparaissent sous forme extrinsèque. Il est toutefois important de noter qu'en réalité l'étude de la Nature correspond d'abord à une démarche en sens inverse. C'est de l'observation des fonctions que l'on part pour aboutir, par induction, à l'attribution d'un certain nombre de caractéristiques aux éléments, c'est-à-dire à leur définition. On peut même dire que, dans une phase antérieure, c'est déjà de l'observation du monde qui nous entoure, des relations et des variations que nous y décelons, que se dégage peu à peu la notion même d'élément. Cette observation primordiale, qui nous conduit à abandonner la perception indifférenciée, c'est-à-dire la perception d'un tout comme élément unique, se traduit en définitive par deux opérations complémentaires, l'une analytique qui correspond à la partition en éléments, et l'autre synthétique qui respecte l'interdépendance des parties sous la forme de relations entre les éléments. La notion de fonction correspond à une étape essentielle de la recherche des facteurs qui interviennent dans les relations entre éléments. Il arrive fréquemment que les éléments d'un système interviennent dans les relations qui les concernent sous des formes très diverses, c'est-à-dire selon des processus qui apparaissent notablement différents. Il est évidemment intéressant d'essayer de discriminer ces processus, et de les ramener à un nombre aussi réduit que possible d'interactions typiques et irréductibles entre elles, ce qui revient précisément à dégager les fonctions élémentaires. Cette réduction progressive, dont l'intérêt pour l'unification des sciences est évident, est déjà contenue en germe dans toute démarche inductive faisant passer de l'observation des relations entre éléments à l'attribution à ceux-ci de caractéristiques intrinsèques diverses, ainsi que nous le verrons bientôt.

La partition en éléments et l'attribution de caractéristiques intrinsèques à ceux-ci constituent donc deux opérations qui sont en étroite corrélation. Dès qu'une partition est choisie, l'observation des relations entre éléments permet de dégager peu à peu un certain nombre de fonctions élémentaires et d'accéder ainsi aux caractéristiques intrinsèques. A deux partitions différentes peuvent correspondre des fonctions différentes, et par conséquent aussi des caractéristiques intrinsèques différentes. Le choix initial qui préside à la partition revêt donc une grande importance. Il peut entraîner des conséquences plus ou moins heureuses dans le développement ultérieur de la théorie, quant à l'extension, à la simplicité, ou à l'esthétique de celle-ci. On ne peut jamais prétendre *a priori* qu'une partition initialement échoisie sera la meilleure dans tous les cas, et ce n'est très souvent que par une série d'approximations successives que l'on parvient à un choix satisfaisant. En outre, il est bien évident que les partitions possibles dépendent étroitement du niveau d'observation auquel on se place. Les modèles théoriques élaborés pour la description et l'explication des phénomènes peuvent être très différents selon ce niveau, et par conséquent aussi selon la partition choisie.

Le passage de l'observation des relations entre éléments à la discrimination en fonctions élémentaires est d'une manière générale difficile, comme l'est toute démarche inductive. Il est bien rare que ce passage apparaisse d'emblée évident et univoque, et cela est d'autant plus vrai que les éléments en présence sont plus nombreux et plus divers. On conçoit aisément que ce problème doive être abordé en premier lieu sur des systèmes aussi simples que possible, c'est-à-dire comportant peu d'éléments, semblables ou appartenant à un très petit nombre de types différents. En outre, le système ainsi étudié doit pouvoir être considéré comme isolé du monde extérieur, tout au moins en ce qui concerne les interactions qui sont précisément l'objet de l'étude. C'est bien en opérant de cette façon que s'est développée petit à petit notre connaissance de la nature, et l'on pourrait même dire que c'est en s'efforçant de travailler sur des partitions du monde, c'est-à-dire sur des systèmes, aussi simples que possible, que la physique classique est parvenue progressivement à dégager les grandes fonctions élémentaires du monde matériel que nous connaissons aujourd'hui. Le système simple constitué d'un objet quelconque et de la Terre, convenablement isolé des interactions parasites par l'élimination de l'atmosphère, a permis d'étudier la fonction de pesanteur ou de gravitation, et a conduit ainsi à la notion de masse comme caractéristique intrinsèque des éléments. D'une manière analogue, c'est d'abord à partir d'un système simple à deux éléments qu'à pu être mise en évidence la fonction d'interaction électrique, et corrélativement la caractéristique intrinsèque de charge électrique. La même situation se retrouve lorsqu'il s'est agi de préciser au niveau macroscopique les interactions prenant la forme d'échanges de chaleur ou d'énergie mécanique, et de définir convenablement les caractéristiques de capacité calorifique et de température. On pourrait évidem-

ment multiplier les exemples de ce type. On constate toujours que ce n'est que très progressivement que la science parvient à étudier des systèmes plus complexes, et dans lesquels en particulier interviennent plusieurs fonctions élémentaires. Les domaines où la rigueur apparaît le plus difficilement accessible sont précisément ceux où l'on ne parvient pas à réaliser des conditions correspondant à l'intervention d'une seule fonction élémentaire, ou à la rigueur d'un très petit nombre de telles fonctions. C'est le cas en particulier pour tout ce qui touche au monde vivant. On peut se demander à quoi reconnaître en pratique qu'une seule fonction élémentaire intervient dans un système. Il n'y a en fait aucune réponse simple à cette question. Tout au plus peut-on énoncer un principe général, qui constitue d'ailleurs un guide qu'une règle précise. On peut dire, d'une manière générale, qu'une fonction élémentaire intervenant entre deux éléments donnera lieu à une interaction exprimable par une combinaison simple d'un très petit nombre de caractéristiques. Par exemple, s'il s'agit d'un système matériel, on sera pratiquement assuré que l'on a affaire à une fonction élémentaire si les interactions observées sont exprimables à l'aide d'une seule caractéristique intrinsèque particulière et des caractéristiques de situation spatiale et éventuellement de mouvement. Ceci ne préjuge d'ailleurs en rien du fait que certaines caractéristiques peuvent apparaître indépendantes à un certain niveau, alors qu'en réalité il existe entre elles une dépendance, apparaissant à un autre niveau d'observation et entraînant par conséquent une réduction du nombre de caractéristiques nécessaires. C'est ainsi que les interactions électriques, qui s'expriment simplement à partir de la caractéristique de charge électrique et des coordonnées spatiales, apparaissent bien comme l'expression d'une fonction élémentaire. De même, au niveau macroscopique, on rend compte aisément des interactions magnétiques à partir de la notion de masse magnétique et des coordonnées d'espace, ce qui a fait considérer ce type d'interactions comme élémentaire. Cette conclusion était tout à fait légitime au niveau d'observation choisi, même si l'on est parvenu ensuite à montrer que la notion de masse magnétique était réductible à celle de charge électrique associée aux caractéristiques du mouvement.

La mise en évidence de fonctions élémentaires à partir de l'observation des relations entre éléments apparaît bien en définitive comme la partie la plus difficile de la démarche inductive. Le passage de la connaissance d'une fonction, reconnue comme élémentaire, à l'attribution de caractéristiques intrinsèques, constitue une étape moins délicate puisqu'elle se traduit, dans un grand nombre de cas, par l'énoncé d'un prédicat qualitatif unique accompagné éventuellement de caractéristiques quantitatives propres à chaque élément. La difficulté particulière à ce stade n'apparaît qu'ultérieurement, lorsqu'il s'agit de s'assurer de l'indépendance de la nouvelle caractéristique intrinsèque par rapport aux caractéristiques déjà connues, ou dans le cas contraire d'établir les véritables relations de dépendance. Ce problème ne peut en général être réglé qu'en accédant à un niveau

plus fin de description, le maintien au même niveau d'observation ne permettant le plus souvent que l'établissement de relations empiriques et non explicatives.

Il est évident que l'accès à la connaissance scientifique d'un élément unique, supposé totalement isolé, est en principe exclu. Ce n'est que par les interactions auxquelles il participe qu'un objet manifeste sa présence et ses propriétés, de manière durable ou reproductible. La moindre connaissance relative à cet objet exige bien entendu que celui-ci agisse d'une manière ou d'une autre sur nous-mêmes, directement ou par l'intermédiaire des appareils d'observation que nous utilisons. Cette condition *sine qua non* correspond à la situation d'un élément semi-isolé, c'est-à-dire ne recevant rien de l'extérieur mais émettant néanmoins vers l'extérieur divers signaux. L'élément considéré est donc dans un état instable et, si l'on admet la validité générale de la loi de conservation de l'énergie, on peut affirmer que cette situation ne durera pas indéfiniment. Les observations que nous pouvons faire dans ce cas correspondent donc à des phénomènes transitoires. Elles nous donnent accès, au moins partiellement, à une partie des fonctions que peut remplir l'élément, c'est-à-dire aux fonctions particulières que nous avons déjà rencontrées sous le nom de propriétés intrinsèques. D'une manière générale, les phénomènes ainsi observés dépendent de l'histoire antérieure de l'élément, et en particulier de l'état dans lequel il se trouvait au moment où il a été isolé de toute action venant de l'extérieur. En faisant varier cette histoire antérieure aux observations, divers aspects des propriétés intrinsèques de l'élément peuvent être mis en évidence.

La situation de semi-isolément qui vient d'être évoquée est en réalité assez rare, surtout si on la considère dans toute sa rigueur. Dans la grande majorité des cas, les éléments observés participent à des interactions multiples et diverses, dont certaines peuvent correspondre à des échanges dans les deux sens avec le milieu extérieur. La recherche des fonctions élémentaires peut, de ce fait, être parfois rendue très difficile. Le but à atteindre est toujours de parvenir à isoler un phénomène simple, en éliminant les interactions parasites susceptibles de le modifier, et en montrant que les interactions secondaires qui subsistent n'ont aucune influence sur lui ou sont négligeables. Ces opérations de discrimination peuvent être plus ou moins complexes ou délicates, ne serait-ce tout d'abord que parce que la notion même de phénomène simple requiert une estimation qui n'est pas entièrement exempte de subjectivité, ainsi que nous l'avons vu. Elles nécessitent la plupart du temps une approche par tâtonnements dans laquelle les connaissances antérieures, les hypothèses, et les vérifications expérimentales, jouent un rôle important. Il arrive bien entendu que ces démarches imbriquées aboutissent rapidement à des situations simples, et l'on conçoit que le fait de ne pas rechercher une trop grande précision soit, de ce point de vue, favorable. On peut citer, à titre d'exemple, l'étude de la pesanteur par l'observation de la chute d'un corps au voisinage de la Terre. Le système considéré

obéit bien au critère de simplicité, comme il se doit chaque fois que l'on recherche une fonction élémentaire, puisqu'il est constitué de deux éléments, la Terre et le corps dont on étudie la chute. Mais en pratique, et sans précautions particulières, le système réel est plus compliqué puisqu'il comporte aussi l'atmosphère entre le corps et la Terre. Il s'agit bien là, comme l'expérience le montre, d'un élément parasite qui doit être éliminé puisqu'il perturbe, par les phénomènes de frottement, l'interaction élémentaire que l'on veut étudier. En revanche les interactions qui se produisent entre les éléments du système et la lumière, interactions qu'implique obligatoirement toute observation visuelle des éléments, apparaissent comme secondaires et sans influence sur le phénomène de base étudié. Cet exemple, particulièrement simple, n'a été choisi que pour illustrer les notions de phénomène parasite et de phénomène secondaire. Les situations de ce type sont en vérité assez exceptionnelles, et la recherche des fonctions élémentaires se présente souvent dans des conditions beaucoup plus difficiles. Les premières difficultés apparaissent lorsque l'on veut rendre compte d'observations de plus en plus précises. Il est alors fréquent qu'un certain nombre de phénomènes parasites, qui pouvaient être auparavant négligés, interviennent de manière significative, ce qui rend de plus en plus délicat l'isolement d'un seul phénomène. On peut d'ailleurs dire, d'une façon générale, qu'à l'observation de plus en plus précise d'un système correspond une diminution du nombre de phénomènes pouvant être considérés comme secondaires, et une augmentation du nombre de phénomènes devant être considérés comme parasites. Cette situation n'est cependant pas rédhibitoire tant que les interactions en jeu se répartissent sur une assez grande échelle d'intensités. La progression, des niveaux d'observation les moins précis aux niveaux les plus précis, permet alors de séparer par étapes successives les différents types d'interactions, et d'évaluer leur importance relative. C'est ainsi qu'à surtout progressé notre connaissance de la nature au cours des siècles passés. Les difficultés deviennent déjà plus sérieuses lorsque plusieurs types d'actions se manifestent simultanément et avec une importance comparable. Si les connaissances antérieures ne permettent pas d'identifier *a priori* dans le phénomène global la présence simultanée de fonctions élémentaires, ou si les raffinements expérimentaux n'aboutissent pas à la séparation en phénomènes plus simples, la recherche des fonctions élémentaires devient évidemment difficile. Il arrive ainsi que l'on soit limité à la mise en évidence de fonctions relativement complexes, ou même à une simple phénoménologie globale des effets observés. La même situation se retrouve enfin lorsqu'il est impossible de travailler sur des systèmes suffisamment simples, soit que l'on ne dispose d'aucun moyen d'action, comme en Astronomie, soit que la séparation en systèmes simples fasse disparaître certaines fonctions essentielles comme en Biologie. Si l'on veut dépasser la simple description des phénomènes, la seule voie d'accès qui subsiste est alors, dans le premier cas, d'élaborer des hypothèses théoriques au niveau des fonctions

élémentaires et d'en vérifier le bien-fondé par les conséquences qu'elles entraînent pour le système considéré dans son ensemble. Dans le second cas, la séparation en systèmes plus simples peut toujours être tentée, comme on le fait par exemple en biologie moléculaire, mais on doit s'attendre à ce que le retour progressif au niveau du système complet présente de sérieuses difficultés, en particulier pour retrouver l'origine des fonctions qui disparaissent lors de la séparation en systèmes simples. Pour éviter cela, il faudrait pouvoir réaliser une étude très détaillée de tous les systèmes intermédiaires possibles entre les niveaux les plus simples et le niveau global, ce qui est une entreprise pratiquement impossible dans la plupart des cas. La méthode des hypothèses et des modèles théoriques peut évidemment être aussi employée pour de tels systèmes, mais le risque de gratuité s'accroît très vite au fur et à mesure que la complexité du système augmente. Le caractère hypothétique des modèles théoriques dépend en réalité beaucoup du niveau de description choisi, et le meilleur moyen de réduire ce caractère hypothétique consiste à situer la partition théorique du système au niveau où les éléments sont le mieux connus et le moins différents possible. Nous verrons au chapitre V comment la théorie des systèmes, qui suit précisément cette voie, peut permettre d'aborder ces problèmes avec fruit.

La mise en évidence de fonctions élémentaires se présente en définitive comme une étape essentielle entre la partition en éléments et l'attribution à ceux-ci d'un certain nombre de caractéristiques intrinsèques. Les définitions d'éléments auxquelles on aboutit ainsi par induction sont donc des définitions fonctionnelles, les seules accessibles par la méthode scientifique. En multipliant et en diversifiant l'étude des systèmes dans lesquels intervient un élément donné, il est possible de dégager peu à peu, par ce processus inductif, un certain nombre de caractéristiques intrinsèques correspondant aux différentes fonctions élémentaires auxquelles est susceptible de participer l'élément considéré. Si les systèmes étudiés sont représentatifs de la diversité des systèmes possibles ou peut intervenir l'élément, la synthèse des définitions fonctionnelles obtenues pour chacun d'eux permet d'atteindre une véritable définition pseudo-exhaustive ou universelle de l'élément c'est-à-dire, ainsi que nous l'avons vu au chapitre I, une définition valable pour tous les cas que l'on rencontre en pratique.

Il ne faut pas oublier toutefois que la recherche des caractéristiques significatives d'un système n'aboutit pas toujours exclusivement à l'attribution de caractéristiques intrinsèques aux éléments. Dans de nombreux cas il subsiste ce que l'on pourrait appeler de ce point de vue un résidu, sous forme de caractéristiques extrinsèques. Il est en effet rarement possible, ainsi que nous l'avons vu au chapitre I, de pousser la différenciation d'un système jusqu'à éliminer toute caractéristique sous forme extrinsèque. Et l'on peut se demander si, dans ces conditions, la notion de définition pseudo-exhaustive d'un élément garde un sens suffisamment précis. En effet, une telle définition est censée contenir tout ce qui est nécessaire pour rendre compte du

comportement de l'élément dans les situations les plus diverses, ce qui exclut que certaines caractéristiques apparaissent uniquement sous forme extrinsèque. Pour répondre à cette question il faut rap-peler en premier lieu que les deux types de caractéristiques corres-pondent en fait à deux niveaux différents, les caractéristiques intrin-sèques au niveau des éléments, et les caractéristiques extrinsèques au niveau du système. Mais il faut surtout, en second lieu, noter qu'une caractéristique peut être considérée comme extrinsèque pour des raisons diverses et très différentes.

La première raison est que la caractéristique considérée correspond sans ambiguïté possible au niveau du système; c'est le cas, par exemple, pour l'ensemble des nombres d'éléments contenus dans les diverses classes-repères.

La seconde est que la caractéristique exprime une action extérieure imposée au système; c'est le cas, par exemple, de l'action d'un champ extérieur sur le système ou, d'une manière plus générale, de l'action de tout élément ou système extérieur. On voit tout de suite que dans ce cas, c'est essentiellement le choix initial retenu pour la partition en éléments qui permet de traduire l'action considérée sous forme de caractéristique extrinsèque du système. Le regroupement du système initialement considéré et des influences extérieures qu'il subit serait toujours possible et donnerait lieu à un nouveau système unique, sous réserve d'une modification adéquate du nombre et de la définition des classes-repères. On retrouve ici, une fois encore, le caractère très relatif de la définition des classes-repères, c'est-à-dire des états que peuvent prendre les éléments du système. La prise en considération de tous ces états possibles, pour des interactions très diverses, est un facteur important dans la recherche de la définition pseudo-exhaus-tive des éléments.

La troisième raison est qu'une caractéristique peut être considérée comme extrinsèque pour des raisons de commodité dans l'étude du système. Rien ne s'oppose alors à ce qu'elle soit exprimée, si besoin est, sous la forme de caractéristique intrinsèque des éléments. C'est le cas, par exemple, de la température qui est bien une caractéristique extrinsèque, et de sa traduction en termes d'énergie cinétique des éléments, termes qui correspondent alors à des caractéristiques intrinsèques.

La quatrième raison enfin, est qu'une caractéristique peut être considérée comme extrinsèque sans que l'on sache si elle correspond obligatoirement au niveau du système ou s'il est possible de la tra-duire sous forme de caractéristiques intrinsèques des éléments. C'était le cas de la température avant l'établissement de la théorie cinétique de la chaleur.

Les trois derniers cas qui viennent d'être énumérés ont bien une incidence directe sur la définition des éléments, mais ils n'intervien-nent pas de la même manière dans la recherche d'une définition pseudo-exhaustive. Le troisième cas, par exemple, ne présente aucune diffi-culté puisqu'il est toujours possible de traduire la caractéristique

extrinsèque considérée en termes de caractéristiques intrinsèques des éléments. Le quatrième cas, en revanche, représente une limite imposée par notre ignorance de la signification profonde de la caractéris-tique extrinsèque. Puisque l'on ne peut pas affirmer que cette carac-téristique n'est pas traduisible en termes intrinsèques, on ne peut pas assurer que les définitions adoptées pour les éléments du système sont universelles. Le second cas enfin correspond à une situation classique dans la recherche des diverses fonctions auxquelles sont susceptibles de participer les éléments, et elle est directement liée à la partition adoptée dans la première étape de l'étude. Dans le nouveau système obtenu par le regroupement du système initialement considéré et des actions extérieures qu'il subit, le problème de la signification des caractéristiques extrinsèques et de leur traduction éventuelle en termes intrinsèques se retrouve sous l'une des trois autres formes évoquées.

En définitive, on peut dire que l'on a atteint la définition univer-selle d'un élément lorsque les caractéristiques intrinsèques contenues dans cette définition permettent, seules ou en combinaison avec les caractéristiques des autres éléments, de rendre compte de l'ensemble des fonctions auxquelles est susceptible de participer l'élément dans les divers systèmes où il peut être inclus.

Les considérations qui précèdent nous permettent de faire une dernière remarque sur le problème de la définition des classes-repères et des éléments qui les occupent. Etant donné que les classes-repères dont il est nécessaire de tenir compte peuvent être très diverses selon les fonctions mises en jeu, c'est-à-dire selon l'ensemble des éléments en présence, on peut se demander s'il n'y a pas lieu d'établir un cer-tain nombre de distinctions entre différents types de classes-repères, dans le sens où nous l'avons déjà fait à propos des classes qualitatives et des sous-classes quantitatives. On voit immédiatement qu'il s'agit là d'une simple question de convention mais, comme il arrive fréquem-ment, une telle convention peut être très utile pour la description claire des systèmes. Il s'agit en somme d'un problème de classification, analogue à celui qui se pose en Systématique Biologique, et que les spécialistes de cette discipline résolvent en utilisant les notions d'em-branchement, de classe, d'ordre, de famille, de genre, et d'espèce. Il est tout à fait possible d'adopter des distinctions de ce type dans la définition d'éléments quelconques, mais il semble bien que quatre notions seulement soient fondamentalement utiles. On peut ainsi défi-nir, par exemple, les catégories suivantes :

— L'Ordre, par l'existence d'un ensemble donné de prédicats qualitatifs.

— La Famille, par les mêmes prédicats qualitatifs que l'ordre supérieur, et par un certain nombre d'autres prédicats qualitatifs considérés comme secondaires par rapport aux premiers.

— Le Genre, par les prédicats qualitatifs de la famille supérieure,

chacun d'eux étant maintenant accompagné d'une caractéristique quantitative située dans une certaine gamme assez large de valeurs.

— L'Espèce (ou l'Etat), par les mêmes données que le genre supérieur, chaque caractéristique quantitative étant maintenant située dans une sous-gamme de valeurs plus étroite que dans le cas du genre, ou correspondant même à une valeur unique parfaitement définie.

On remarquera à quel point la notion de fonction est présente, de manière sous-jacente, dans une telle classification. Le passage de l'Ordre à la Famille introduit en effet une hiérarchie des prédicats qualitatifs, c'est-à-dire des fonctions dans lesquelles interviennent ces prédicats. Ceux qui servent à définir l'Ordre sont considérés comme de première importance, alors que ceux qui correspondent aux différentes familles d'un même ordre ne se voient reconnaître qu'une importance secondaire. C'est d'ailleurs dans le but de nuancer et de préciser cette hiérarchie que la Systématique Biologique utilise un plus grand nombre de catégories. Il faut toutefois se garder d'aller trop loin dans cette voie qui n'est légitime, en toute rigueur, que si l'on connaît parfaitement les relations existant entre tous les prédicats et toutes les fonctions auxquelles peut participer l'élément. Ce n'est évidemment pas toujours le cas, surtout lorsque les éléments considérés sont complexes. Un prédicat qualitatif ne peut être considéré comme secondaire que si l'on a pu s'assurer que sa suppression ne modifie que d'une manière négligeable l'ensemble des fonctions auxquelles est susceptible de participer l'élément. Or, l'inventaire exhaustif de toutes ces fonctions devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que croît la complexité des éléments. Il est donc indispensable pour toute classification admettant une hiérarchie des prédicats qualitatifs, de préciser à quel ensemble de fonctions elle se rapporte.

L'importance relative des différentes fonctions ne relève pas seulement dans le cas général, d'un simple jugement qualitatif. Il est nécessaire de tenir compte aussi des valeurs numériques qui leur sont associées, et c'est précisément le but des distinctions quantitatives introduites ci-dessus dans les catégories du Genre et de l'Espèce. Ces subdivisions permettent de distinguer des éléments qui, bien que définis à partir des mêmes prédicats qualitatifs, participent pratiquement à des fonctions différentes par suite des grandeurs des caractéristiques quantitatives correspondant à chacun d'eux. Par exemple, pour des éléments doués de masse et de charge électrique, les fonctions d'interactions gravitationnelle et électrique peuvent intervenir simultanément, parce que leurs ordres de grandeur sont comparables, ou au contraire se réduire pratiquement à l'une d'entre elles si les valeurs des caractéristiques quantitatives rendent l'une négligeable par rapport à l'autre. Ces subdivisions quantitatives qui ne sont guère utilisées en Systématique biologique par suite de la complexité des éléments considérés, sont cependant d'une importance

fondamentale et doivent par conséquent être introduites dans tout principe universel de classification.

Si les exemples qui ont servi à expliciter et à illustrer la notion de fonction ont été surtout empruntés aux systèmes matériels, les conclusions concernant l'importance de cette notion sont également valables pour les systèmes abstraits, imposés ou construits. Le problème peut se présenter de manière un peu différente selon la nature du système considéré, mais en définitive l'importance de la notion de fonction reste toujours aussi grande. Dans la plupart des systèmes abstraits construits cette importance apparaît d'ailleurs avec le maximum d'évidence puisque, ainsi que nous l'avons vu, les éléments sont alors directement et uniquement définis par les fonctions qu'on leur attribue *a priori*.

D'une manière tout à fait générale, on peut dire que la notion de fonction se situe à la fois à l'origine et au terme de toute démarche scientifique. A partir de la partition en éléments et de l'observation des fonctions d'interactions entre ceux-ci, on aboutit à la définition des éléments. Puis par une théorie déductive, c'est-à-dire obéissant à des règles logiques, on s'efforce de prévoir ce que sera le comportement de ces éléments dans un système non encore observé expérimentalement. Tout ce processus, inductif et déductif, apparaît donc bien en définitive comme un effort de généralisation et de synthèse de nos connaissances au niveau de la notion de fonction, ce qui marque toute l'importance de celle-ci.

FONCTION D'UN SYSTÈME DANS UN SYSTÈME DE SYSTÈMES.

Nous avons admis jusqu'à présent que les éléments constitutifs d'un système étaient des êtres définis chacun globalement par un certain nombre de caractéristiques permettant d'exprimer leurs diverses fonctions dans le système. Mais en réalité un élément quelconque peut être lui-même un système. On aboutit ainsi à la notion de système de systèmes dont l'exploration va permettre d'expliciter davantage les liens existant entre les concepts de fonction et de structure.

La première question qui se présente à ce sujet est de savoir à quoi il est possible de reconnaître qu'un élément est lui-même un système. La réponse qui vient d'abord à l'esprit consiste à dire qu'un élément est un système s'il est, par un moyen quelconque, décomposable en sous-éléments distincts. En fait une telle réponse, bien qu'exacte, est beaucoup trop rudimentaire ou trop radicale. Un élément peut très bien être un système, et il peut être avantageux de le considérer comme tel, même si les éléments qui le constituent ne sont pas séparables dans les conditions expérimentales choisies. En outre, tout ce qui a été dit du caractère relatif de la partition d'un système en élé-

ments, et des choix plus ou moins arbitraires ou commodes qui peuvent présider à cette opération, montre bien que la séparation complète en éléments distincts n'est pas une nécessité pour aboutir à la notion de système. On peut même dire qu'une telle séparation totale ne peut apporter qu'une connaissance très partielle du système puisqu'elle supprime les interactions entre éléments, alors que ces interactions constituent des données essentielles du système. Enfin, l'isolement complet ou quasi complet des éléments, et l'étude de leurs propriétés dans ces conditions, peut éventuellement masquer certaines fonctions susceptibles d'être remplies par ces éléments mais n'apparaissant de manière non négligeable que lorsque ceux-ci sont plus étroitement insérés dans le système. Cette situation peut, par exemple, entraîner le risque de considérer une caractéristique d'élément comme constante, alors qu'elle est en fait variable lorsque les interactions à l'intérieur du système deviennent plus fortes. L'idéal serait d'étudier chaque élément à des degrés divers d'insertion dans le système considéré, mais cela n'est malheureusement pas toujours possible.

Le retour en arrière que nous venons de faire sur la définition des éléments n'est pas seulement une digression, ou une précision complémentaire qui aurait pu être donnée dès le chapitre I. Il permet de mieux comprendre pourquoi la possibilité de séparation totale en sous-éléments n'est pas une condition nécessaire pour affirmer qu'un élément est un système. Les caractéristiques qui servent à définir l'élément, considéré globalement, et celles qui servent à définir le système qu'il constitue (définitions des sous-éléments et des interactions entre eux), ne sont évidemment pas indépendantes. Les premières sont en principe déductibles des secondes. Si, à la limite, la séparation totale des éléments d'un système entraîne le fait que les propriétés globales de celui-ci ne sont plus que la simple somme des propriétés individuelles des éléments, les divers degrés de séparations partielles doivent conduire à des situations intermédiaires correspondant à des propriétés différentes du système considéré globalement, les différences pouvant être qualitatives ou quantitatives. Autrement dit, toute modification des caractéristiques servant à définir le système comme un ensemble d'éléments interagissant doit se traduire en principe par une modification des caractéristiques définissant le système comme un élément unique, c'est-à-dire au niveau global. En réalité cette conclusion est discutable car il peut arriver, d'une part que certaines variations de caractéristiques du système ne soient pas décelables au niveau global, d'autre part et surtout, que certaines de ces variations internes au système correspondent à des modifications concomitantes de plusieurs caractéristiques se traduisant par un effet nul au niveau global. Nous touchons ici au problème des transformations invariantes sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Si l'existence de variations internes au système ne se traduit pas obligatoirement par des variations des caractéristiques au niveau global, l'inverse en revanche est plus clair. Une variation au niveau des caractéristiques globales correspond inévitablement à la variation

d'une ou plusieurs caractéristiques au niveau du système sous-jacent. En effet, si aucune des caractéristiques internes ne varient, on n'observerait aucun changement des caractéristiques globales puisque ces dernières sont exprimables à partir des premières. Cette conclusion aurait d'ailleurs pu être obtenue de manière plus directe et intuitive, en observant simplement qu'il est difficile de concevoir comment un élément manifesterait certaines variations de ses caractéristiques globales s'il n'était constitué de parties dont l'arrangement est susceptible de varier, c'est-à-dire s'il n'était pas en fait un système.

On peut donc dire, en définitive, qu'un élément quelconque dont les caractéristiques varient constitue lui-même un système. Bien entendu, la réciproque n'est pas vraie, pour les raisons déjà évoquées. D'un élément ne manifestant aucune variation de ses caractéristiques globales, on ne peut pas affirmer qu'il n'est pas un système. La notion de système doit être prise ici dans son acception la plus large, et il est bien évident que la nature du système sous-jacent à un élément peut être très différente selon la nature des caractéristiques globales qui varient. En fait, pour procéder à une telle analyse il faut d'abord considérer que toutes les caractéristiques qui peuvent être attribuées à l'élément, c'est-à-dire en tant que caractéristiques intrinsèques, le sont effectivement sous cette forme. Toute variation observée sur ces caractéristiques intrinsèques signifie que l'élément constitue un système, tout au moins relativement à ces caractéristiques. Nous retrouvons à ce propos les problèmes déjà évoqués quant au rôle particulier que jouent les caractéristiques spatiales et de mouvement, et les difficultés apparentes qui s'ensuivent lorsque l'on considère ces caractéristiques comme intrinsèques. Il est évident que le fait d'observer une variation des coordonnées spatiales d'un élément ne signifie pas que cet élément constitue en lui-même un système. Cette constatation correspond simplement au fait que l'objet défini à partir de toutes ses caractéristiques autres que spatiales, d'une part, et le référentiel d'espace, d'autre part, constituent un système. Il n'y a là en réalité rien d'anormal, mais seulement une difficulté apparente liée à notre notion intuitive d'objet ou d'élément, qui est indépendante du concept d'espace. On pourrait dire aussi, et cela est équivalent, que cette difficulté est liée au « découpage du monde » adopté, c'est-à-dire à la partition en éléments dans laquelle les caractéristiques spatiales sont considérées comme intrinsèques. Le côté partiellement arbitraire de la partition en éléments, ou si l'on préfère, les préoccupations de commodité qui président souvent à cette partition, ont été suffisamment analysés dans les chapitres précédents pour qu'il ne soit pas nécessaire d'y revenir ici. Il pourra être utile cependant de se souvenir que c'est également à cause du décalage existant très souvent entre notre notion intuitive d'élément et la description que peut en donner une théorie formalisée, que certaines interprétations théoriques de phénomènes naturels apparaissent parfois *a priori* curieuses. La théorie de la Relativité, avec sa traduction des phénomènes électromagnétiques et gravitationnels en termes de propriétés

de l'Espace-Temps, en est un exemple. Nous avons d'ailleurs déjà analysé en détail, dans les paragraphes précédents, les arguments de commodité et même de logique en faveur de l'inclusion des coordonnées spatiales et de mouvement dans l'ensemble des caractéristiques intrinsèques d'un élément. Le lien étroit qui existe souvent entre les caractéristiques spatiales ou de mouvement et certaines caractéristiques qui nous apparaissent *a priori* comme notoirement intrinsèques, n'est pas l'une des moindres raisons pour opérer ainsi. L'exemple déjà rencontré à propos des propriétés magnétiques, liées à la fois à la charge électrique et aux caractéristiques de mouvement, va tout à fait dans ce sens. Ces considérations ne sont d'ailleurs pas seulement valables pour les éléments matériels ; elles s'appliquent également aux éléments abstraits pour lesquels les caractéristiques spatiales et de mouvement peuvent n'avoir aucun sens. D'une manière générale, le passage d'un élément quelconque donné globalement, au système sous-jacent qui le constitue, exige la prise en compte, sous forme intrinsèque, de toutes les caractéristiques qui ne sont pas de manière évidente extrinsèques.

Le fait que les éléments d'un système peuvent être eux-mêmes des systèmes exige que l'on examine maintenant de manière précise comment peut se traduire la notion de fonction appliquée à un système, lorsque celui-ci est placé en présence d'autres systèmes qui constituent son environnement. Nous avons abondamment discuté le cas des éléments définis globalement par un certain nombre de caractéristiques, qualitatives et quantitatives, qui permettent d'exprimer les propriétés de ces éléments dans un environnement constitué d'autres éléments dont chacun est également défini de manière globale. Il s'agit maintenant de transposer ces considérations au cas où les éléments en présence sont en fait des systèmes, afin de voir comment les propriétés d'un système peuvent être reliées aux caractéristiques qui servent à le définir, et en particulier aux données qui constituent sa structure interne relationnelle ou totale.

Considérons donc un système A , en présence d'autres systèmes $B, C, D, \dots$. Chacun de ces systèmes, considéré seul, est défini par un certain nombre de classes-repères correspondant aux états que peuvent prendre ses éléments constitutifs, puis par les relations entre classes-repères qui expriment les transferts possibles d'éléments entre ces différentes classes compte tenu des interactions dont le système est le siège. Il importe peu ici de savoir si les éléments constitutifs de ces systèmes sont eux-mêmes des systèmes ; nous admettrons qu'ils sont seulement définis de manière globale. Du point de vue où nous nous plaçons, qui est celui de la signification des concepts, il suffit en effet d'étudier la transposition qui permet de passer du système d'éléments au système de systèmes. La même transposition peut, en pratique, être répétée autant de fois qu'il apparaît nécessaire selon les niveaux de description que l'on veut explorer. S'il est nécessaire pour cela de savoir à chaque étape à quoi reconnaître qu'un élément est lui-même un système, ce qui est assez facile comme nous

l'avons vu, il faut aussi savoir comment peut être décrit ce système sous-jacent, ce qui est en général beaucoup plus difficile. Ce problème pratique sera examiné en détail au chapitre V, à propos de la théorie des systèmes. Mais nous n'avons pas à en tenir compte ici où nous importe seulement l'éclaircissement des rapports qui peuvent exister entre la notion de fonction et les diverses caractéristiques servant à définir un système. Il suffit pour cela, comme nous allons le voir, de considérer une seule des transpositions dont il vient d'être question. Et puisque nous avons déjà étudié le cas du système constitué d'éléments définis chacun de manière globale, il nous reste à examiner le cas du système de systèmes, chacun de ces systèmes étant lui-même constitué d'éléments définis à leur tour par des caractéristiques globales.

Comme il a été dit au début du présent chapitre la notion de fonction, qui exprime l'ensemble des propriétés que manifeste par exemple un système A lorsqu'il est en présence des systèmes $B, C, D, \dots$, ne peut pas être définie à partir des seules caractéristiques de A . Il ne pourrait en être ainsi, comme nous l'avons vu, que pour les propriétés intrinsèques du système A , alors que le concept de fonction englobe aussi les propriétés correspondant aux interactions réciproques mettant en jeu à la fois le système A et les systèmes $B, C, D, \dots$. Ce point de principe étant rappelé, il n'en reste pas moins que les caractéristiques de A interviendront à des titres divers dans l'explicitation des propriétés de ce système. Nous avons vu au chapitre II que les données qui permettent de définir entièrement un système sont nombreuses, et qu'elles touchent à la fois à l'existence et à la définition des classes-repères, et à l'existence et la définition des relations entre classes-repères. Le problème est maintenant de savoir à quel titre et de quelle manière interviennent ces différentes données lorsque l'on cherche à rendre compte, à partir d'elles, des propriétés que manifeste le système. Il est impossible de répondre complètement à cette question avant d'avoir étudié le concept d'évolution, et plus particulièrement ce qu'il implique en ce qui concerne l'expression « évolution d'un système ». Mais il est en revanche possible, dès maintenant, d'explicitier certains aspects de cette question, et en particulier ceux qui touchent aux relations existant entre la structure et les propriétés d'un système. On conçoit que tout éclaircissement sur ce premier point puisse être déjà d'une grande utilité, les relations « structure-fonction » étant très fréquemment évoquées avec un contenu qui apparaît en définitive assez flou.

Nous examinerons d'abord le cas des systèmes matériels, en distinguant successivement les interactions avec ou sans échange de matière. Cette distinction est surtout utile pour permettre une exposition claire des facteurs susceptibles d'intervenir dans une interaction quelconque. C'est pourquoi nous l'adoptons ici, bien que les conclusions relatives aux rapports entre les concepts de structure et de fonction soient les mêmes dans les deux cas, ainsi que nous allons le voir.

L'échange de matière exige en premier lieu que les systèmes en cause soient *mis en présence* ou, si l'on préfère, soient dans une certaine *proximité spatiale*. Dès que l'on énonce cette première condition sine qua non des échanges de matière, on constate que les expressions choisies pour l'exprimer, *mise en présence* et *proximité spatiale*, qui se présentent spontanément à l'esprit, sont en réalité très imprécises. La proximité spatiale peut correspondre en effet à des distances extrêmement diverses selon la nature des systèmes considérés et des échanges dont on veut tenir compte. Il est donc nécessaire, pour éviter toute équivoque, d'aborder ce problème sous un aspect beaucoup plus général, c'est-à-dire plus abstrait. Le langage adopté jusqu'à présent, et qui utilise la notion de classe-repère, se prête parfaitement à cet objectif.

Considérons par exemple deux systèmes *A* et *B*, tels que ceux qui sont représentés sur la figure 7. À chacun de ces systèmes, supposé d'abord isolé, correspond un certain nombre de classes-repères représentant les états que la matière est susceptible de prendre à l'intérieur de ce système.

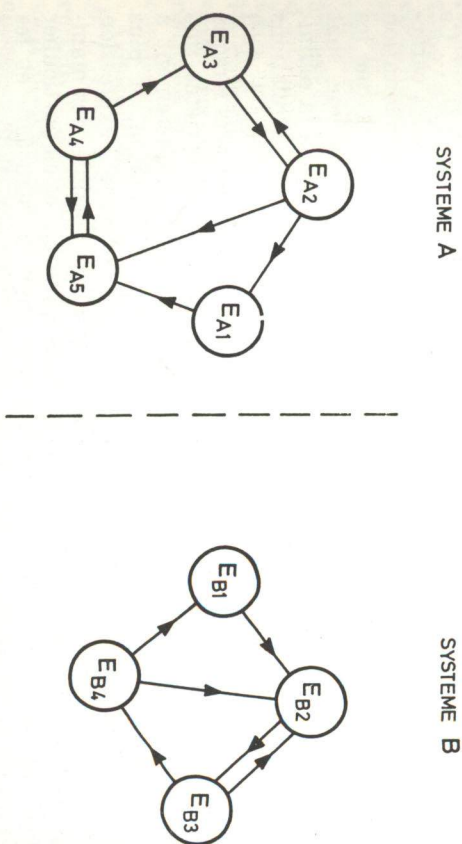


Fig. 7

Si les deux systèmes ont respectivement certaines classes-repères identiques, c'est-à-dire définies à partir des mêmes caractéristiques qualitatives et quantitatives, l'interaction se traduit par la mise en commun de ces classes. Par exemple si les classes E_{A1} du système *A* et E_{B1} du système *B* sont identiques, l'interaction avec échange de matière donnera lieu au système composite *AB* représenté par la figure 8.

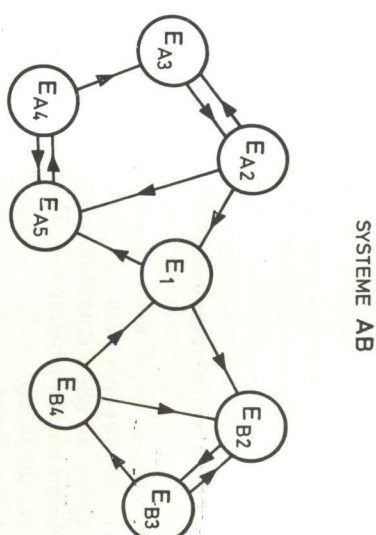


Fig. 8

Mais il faut remarquer tout de suite que cette manière d'opérer, pour déterminer s'il y a effectivement interaction avec échange de matière entre divers systèmes, n'est valable en toute rigueur et en toute généralité que si les systèmes considérés sont au moins *semi-différenciés*, au sens que nous avons donné à ce terme au chapitre I, c'est-à-dire si pour chacun d'eux toutes les caractéristiques qui peuvent être considérées comme intrinsèques le sont effectivement et entrent par conséquent dans les définitions des classes-repères. Et ceci est particulièrement vrai, bien entendu, pour les coordonnées spatiales. En reprenant l'exemple qui vient d'être évoqué, on voit immédiatement que si les classes E_{A1} et E_{B1} sont définies à partir de caractéristiques identiques mais ne comportant pas les coordonnées spatiales, il est impossible de dire *a priori* quoi que ce soit sur les possibilités d'interaction entre les systèmes *A* et *B*. Si les éléments contenus dans les classes E_{A1} et E_{B1} sont identiques en ce qui concerne les seules caractéristiques servant à définir ces classes, mais ne peuvent pas occuper les mêmes situations spatiales, le passage au système *AB* de la figure 8 représentant une interaction avec échange de matière n'a évidemment plus de sens. Dans un cas comme celui-là les coordonnées spatiales, non introduites dans les définitions des classes-repères, sont en fait contenues, implicitement ou explicitement, dans les caractéristiques extrinsèques de chacun des systèmes. Comme nous l'avons vu, elles apparaissent alors sous forme de moyennes statistiques dans ces caractéristiques extrinsèques.

Les considérations qui viennent d'être faites à propos des coordonnées spatiales sont en fait applicables à toutes les caractéristiques servant à définir les systèmes dont on veut étudier les interactions. Pour assurer qu'il y a interaction avec échange de matière par confusion de classes, comme dans le type représenté par la figure 8, l'observation de l'identité de certaines classes-repères appartenant respec-

tivement aux différents systèmes considérés n'est suffisante que si ces systèmes sont au moins semi-différenciés. Lorsque ces systèmes sont partiellement *intégrés*, c'est-à-dire lorsque certaines de leurs caractéristiques sont données sous forme extrinsèque, il est nécessaire d'ajouter à la condition précédente l'identité de chaque caractéristique extrinsèque pour les différents systèmes considérés.

Les interactions avec échange de matière ne se traduisent pas obligatoirement par une mise en commun de classes-repères identiques. Il peut y avoir aussi interaction entre des éléments appartenant à des classes-repères non identiques mais dont les caractéristiques sont telles qu'elles entraînent effectivement l'existence de réactions ou de combinaisons diverses. Pour reprendre l'exemple des systèmes *A* et *B* de la figure 7, il peut se produire que les classes E_{A1} et E_{B1} , tout en n'étant pas identiques, donnent lieu à une réaction entre les éléments correspondants. La figure 9 représente un exemple de réaction de ce type, où les éléments des classes E_{A1} et E_{B1} se combinent pour donner de manière réversible des éléments d'une nouvelle classe E_x .

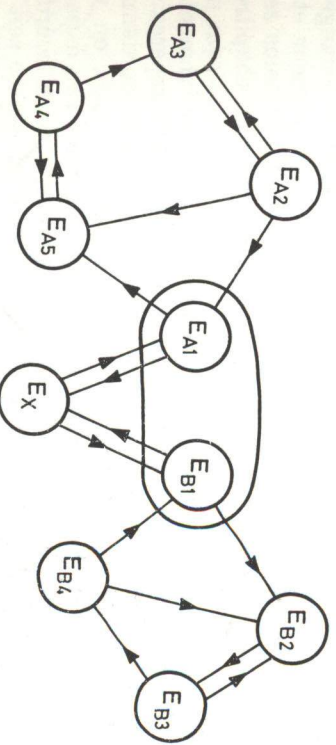


Fig. 9

Il y a encore dans ce cas interaction avec échange de matière. Pour en évaluer la possibilité à partir du seul examen comparatif des systèmes *A* et *B* supposés primitivement isolés, il est encore ici nécessaire, comme dans le cas précédent, de prendre en considération à la fois les caractéristiques intrinsèques et les caractéristiques extrinsèques des deux systèmes.

Les interactions avec échange de matière entre systèmes peuvent évidemment, en pratique, être plus ou moins complexes et mettre en jeu un nombre plus ou moins grand de classes-repères appartenant aux systèmes en cause. Mais, fondamentalement, ces interactions se ramènent toujours aux deux types qui viennent d'être évoqués. On remarquera, en passant, que ces deux types fondamentaux présentent

entre eux une différence essentielle quant à la possibilité que nous avons d'évaluer *a priori* leur probabilité d'existence, à partir de la seule connaissance des systèmes initialement séparés. Le premier type, qui correspond à la confusion de classes-repères, n'exige en effet que l'application d'un principe d'identité. N'entraînant l'apparition d'aucune nouvelle classe-repère, ni d'aucune nouvelle liaison entre classes, il ne nécessite aucune prévision concernant l'existence ou la non-existence de telles données dont l'importance est grande pour la connaissance du système composite. Le second type, en revanche, présente cette difficulté. Il nécessite l'estimation de la probabilité d'interaction entre éléments non identiques, ce qui peut exiger à la limite la mise en œuvre de tout l'arsenal des lois physiques connues afin de vérifier quelles sont celles qui s'appliquent et celles qui ne s'appliquent pas au cas considéré.

Encore faudrait-il être assuré que cet inventaire contient bien l'ensemble des lois correspondant à toutes les interactions possibles, ce qui est illusoire si l'on admet que notre connaissance des lois naturelles est très certainement incomplète.

L'affirmation d'existence des interactions entre divers systèmes nécessite donc la connaissance de la nature des éléments constitutifs de chacun de ces systèmes. Mais il faut noter, en outre, que les interactions entre éléments appartenant à des systèmes différents dépendent aussi des contraintes que subissent déjà ces éléments, contraintes qui s'expriment par les liaisons existant entre les classes-repères des divers systèmes. Si l'on considère par exemple les classes *A* et *B* de la figure 7, il est clair que les éléments des classes E_{A1} et E_{B1} ne réagiront pas en général de la même manière que s'ils n'étaient pas inclus dans les systèmes *A* et *B*. Il peut même arriver que certaines interactions susceptibles de se produire entre ces éléments lorsqu'ils sont libres de toute liaison, ne puissent plus intervenir lorsque ces éléments appartiennent à tel ou tel type de système. Ce cas peut se rencontrer en particulier si les systèmes *A* et *B* introduisent certaines contraintes correspondant à des ségrégations spatiales de leurs éléments constitutifs.

Après avoir étudié les interactions avec échange de matière, il est nécessaire d'examiner maintenant le cas des interactions sans échange de matière, susceptibles de se produire entre divers systèmes. Nous ne trouverons plus ici comme dans le cas précédent des liaisons nouvelles apparaissant, du fait des interactions, entre certaines classes-repères appartenant respectivement aux divers systèmes en cause. Il n'y aura plus d'associations des types représentés par les figures 8 et 9, c'est-à-dire soit par confusion de classes-repères, soit par apparition de nouvelles classes-repères reliées aux systèmes initialement séparés. Les interactions ne se produiront plus que par l'intermédiaire de champs de natures diverses, selon la nature des systèmes considérés.

La présence au sein d'un système *A* des champs issus des systèmes *B*, *C*, *D*, ... qui constituent son environnement, modifie en général

les contraintes et les possibilités de changement des éléments constitutifs de ce système. Ces modifications se traduisent par le fait qu'il n'est plus possible de décrire le système *A* par les mêmes classes-repères et par les mêmes relations entre classes-repères qui donnaient une représentation adéquate de ce système lorsqu'il était, sinon isolé, tout au moins placé dans un environnement différent. En outre, les champs éventuels issus de *A* modifient à leur tour les systèmes de l'environnement. Il se produit une sorte d'induction mutuelle par laquelle les différents systèmes en présence se modifient réciproquement, ce qui entraîne évidemment des difficultés plus ou moins grandes pour aboutir à une description théorique convenable de ces systèmes dont aucun ne peut être considéré indépendamment des autres. Et il faut encore ajouter à cela que la description convenable des systèmes varie en général selon l'importance des interactions qui existent entre eux, c'est-à-dire selon que ces interactions sont fortes ou faibles. Nous retrouvons ici le problème déjà rencontré à propos de la détermination des caractéristiques des éléments définis globalement. Souvenons-nous que ces caractéristiques obtenues par induction à partir de l'observation des propriétés des éléments lorsque ceux-ci sont inclus dans des systèmes aussi simples que possible, sont ensuite conservées, qualitativement ou même quantitativement, pour servir à l'étude des systèmes plus complexes auxquels peuvent participer ces éléments. La difficulté essentielle, dans ce genre d'extrapolation, provient des hypothèses que l'on est conduit à faire en ce qui concerne le caractère variable ou invariable des caractéristiques utilisées. Il se peut que certaines de ces caractéristiques, apparues comme constantes dans les systèmes simples qui ont servi à les déterminer, doivent en fait être considérées comme variables lorsque les éléments en cause sont insérés dans d'autres types de systèmes. Qu'il s'agisse du niveau des systèmes constitués d'éléments définis globalement, ou du niveau des systèmes de systèmes, le même problème subsiste. Et il n'est pas nécessaire de s'avancer beaucoup pour reconnaître là l'une des questions les plus fondamentales et les plus difficiles de la méthodologie scientifique. Sans doute bien des erreurs sont-elles commises par suite d'hypothèses defectueuses sur ce point, et cela peut-être surtout à notre époque où la Science explore des systèmes de plus en plus complexes pour lesquels le passage de la dissection analytique à la reconstitution synthétique est de plus en plus délicat.

Supposons maintenant que les difficultés qui viennent d'être évoquées, quant à la description adéquate des systèmes en présence, soient résolues. Nous avons alors à considérer un ensemble de systèmes dont chacun est défini par un certain nombre de classes-repères et par un certain nombre de relations entre ces classes. Quelles sont les caractéristiques qui interviennent nécessairement dans la détermination qualitative des interactions sans échange de matière existant entre ces systèmes ? Sont-elles les mêmes que lorsqu'il y a échange de matière ? En particulier le contenu du terme *structure*, lorsqu'on parle des relations « structure-fonction », reste-t-il le même que dans

le cas précédent ? On voit tout de suite que les caractéristiques définissant les classes-repères, c'est-à-dire en définitive la nature des éléments matériels qu'elles contiennent, interviennent ici encore puisque les champs qui sont à l'origine des interactions considérées sont produits par les éléments matériels des divers systèmes. On peut dire également, *a priori*, que les liaisons entre classes-repères interviendront, dans la mesure où elles introduisent des conditions qui modifient les champs dont les éléments sont l'origine, par rapport à ce que seraient ces champs si les mêmes éléments étaient supposés isolés. Mais les liaisons interviennent aussi à un autre titre. Supposons que tous les systèmes en présence soient parvenus à un état d'équilibre statique, c'est-à-dire à un état où toutes les caractéristiques qui servent à les définir sont constantes. Chacune des classes-repères des différents systèmes est alors occupée par un certain nombre constant d'éléments. Les conditions de l'équilibre dépendent évidemment des caractéristiques des systèmes en présence, ou tout au moins de certaines d'entre elles, et les liaisons entre les éléments y jouent éventuellement le rôle qui vient d'être évoqué. Supposons maintenant que, dans un des systèmes, un élément passe d'une classe-repère à une autre. Ce transit, par les changements qu'il peut provoquer dans les champs d'interaction, est susceptible de modifier plus ou moins profondément les systèmes en présence. Cela ne veut pas dire, bien entendu, que n'importe quel transit dans n'importe lequel des systèmes provoquera des modifications plus ou moins importantes dans tous les systèmes en présence. Il s'agit seulement d'une possibilité dont l'importance réelle doit être évaluée dans chaque cas particulier, et cette évaluation exige que l'on prenne en considération tous les transits possibles et tous les effets que ceux-ci peuvent produire sur les divers systèmes considérés.

On voit donc, en définitive, que les classes-repères et les liaisons entre ces classes interviennent aussi bien dans les interactions sans échange de matière que dans les interactions avec échange de matière. Il faut d'ailleurs noter que ces deux types d'interactions entre systèmes ne sont pas exclusifs l'un de l'autre. Si les interactions sans échange de matière peuvent exister seules, les échanges de matière en revanche, lorsqu'ils se produisent, sont souvent précédés par des interactions du premier type. Peut-être même s'agit-il là d'une situation tout à fait générale.

Toutes les considérations qui précèdent sur les interactions des systèmes matériels permettent d'aboutir aux conclusions suivantes. *Lorsqu'on parle des relations « structure-fonction », relativement à un système matériel donné, il est d'abord nécessaire de préciser dans quel environnement se trouve placé ce système, car la notion de fonction dans sa signification la plus générale n'a de sens qu'associée à cette connaissance. Il est ensuite important de se souvenir que le terme structure considéré dans ses rapports avec la fonction, et appliqué aux divers systèmes en présence, correspond à la notion de structure totale et non à celle de structure relationnelle.*

Nous allons examiner maintenant le cas des systèmes abstraits; afin de voir comment s'y présente le problème des interactions, ainsi que la notion de fonction qui leur est associée.

Il se peut que la distinction opérée entre systèmes matériels et systèmes abstraits ne soit pas encore apparue comme suffisamment fondée, malgré les arguments avancés en sa faveur au chapitre II. L'étude séparée des systèmes abstraits, en ce qui concerne les interactions de systèmes, va nous permettre d'ajouter à ces arguments. L'objection majeure qui peut être opposée à cette distinction entre systèmes matériels et systèmes abstraits provient de la constatation que notre connaissance d'un système matériel quelconque met toujours et obligatoirement en jeu un système abstrait, qui est une représentation adaptée à notre esprit, à notre entendement. Ainsi, selon cette objection, toute connaissance serait réductible en dernier ressort aux représentations abstraites auxquelles elle correspond dans notre esprit, sous la forme d'images et d'idées. Il est indéniable que toute connaissance nécessite bien l'intervention des systèmes abstraits de notre entendement. Ce point a été vu de manière suffisamment détaillée depuis le début de la présente étude pour qu'il soit inutile d'y revenir ici. Mais cela ne signifie pas que le processus complet de la connaissance soit réductible à cette étape, dans tous les cas et pour tous les types de systèmes qui s'offrent à notre compréhension. Il existe en effet une différence essentielle entre les systèmes matériels et les systèmes abstraits. Les premiers peuvent avoir une spontanéité propre, et des interactions entre eux peuvent se produire indépendamment de l'intervention de notre esprit. La chute d'un corps dans le champ de pesanteur, ou le mouvement des planètes dans le système solaire, sont des phénomènes indépendants de la connaissance que nous en prenons. Les systèmes abstraits, au contraire, n'ont pas de spontanéité propre, et les interactions susceptibles de se produire entre eux requièrent obligatoirement l'intervention de notre esprit. Deux systèmes de mots, constituant chacun une phrase, ne pourront interagir que dans le processus de connaissance, c'est-à-dire par l'intervention de notre esprit qui joue ici un rôle de tiers système obligatoire. Il n'est pas nécessaire, pour reconnaître cette différence essentielle entre les deux types de systèmes, d'entrer dans les paradoxes de la querelle traditionnelle entre philosophes réalistes et philosophes idéalistes. D'un point de vue scientifique, on n'aboutirait à ce genre de problème que si l'on cherchait à étudier les rapports entre une réalité postulée et les représentations que nous en donnons, ou encore si l'on cherchait à analyser dans quelle mesure les instruments matériels que nous utilisons comme intermédiaires indispensables de notre connaissance sont susceptibles de modifier les phénomènes observés. Mais notre but n'est pas là. Il nous suffit ici de constater que les interactions entre systèmes matériels peuvent se produire indépendamment de l'intervention de notre esprit, alors que ce type d'interaction n'est pas possible pour les systèmes abstraits. Si nous trouvons là un argument nouveau pour justifier la

distinction faite entre les deux catégories de systèmes, nous allons voir surtout que cette distinction est utile, car l'étude séparée des interactions entre systèmes abstraits permet de mieux comprendre comment l'esprit intervient dans le processus de la connaissance, quelles sont les tendances profondes qui lui correspondent, et par voie de conséquence quelle est l'origine d'un certain nombre de difficultés fondamentales auxquelles on se heurte inévitablement dans toute démarche cognitive faisant intervenir les notions de système, de structure, et de fonction.

Il faut d'abord noter que, lorsqu'on la transpose des systèmes matériels aux systèmes abstraits, la notion de fonction subit un glissement qui la fait correspondre pratiquement, dans le second cas, à la notion de signification. Parallèlement, la notion d'interaction appliquée aux systèmes abstraits, tend à exprimer l'interdépendance des significations propres à chacun de ces systèmes. Cette situation est bien entendu la conséquence de l'intervention obligatoire de l'esprit dans tout ce que peut contenir le terme interaction appliqué aux systèmes abstraits. Comme nous l'avons vu, ce type d'interaction ne peut se produire que dans le tiers système que constitue l'esprit qui prend connaissance, et il ne peut donc avoir trait qu'à ce qui, dans cet esprit médiateur, constitue une référence suffisamment universelle pour être applicable à tout ce qui est susceptible d'être objet de connaissance; c'est bien là le rôle que joue précisément la signification. On pourrait croire que le passage de la fonction à la signification n'est en somme qu'une transposition synonymique, adaptée aux différents types de systèmes. Et cette opinion ne peut qu'être renforcée si l'on observe que, pour des systèmes matériels, il n'y aurait guère d'inconvénient à remplacer le premier terme par le second. La fonction d'un système matériel *A*, placé dans un environnement constitué d'autres systèmes matériels *B, C, D, ...*, pourrait très bien en effet être considérée comme exprimant la signification du système *A* pour l'environnement dans lequel il se trouve ou, à l'inverse, la signification de l'environnement pour le système *A*. Mais, en réalité, la notion de signification n'a pas tout à fait les mêmes frontières, ni les mêmes implications, que la notion de fonction. Si les différences entre ces deux concepts peuvent parfois apparaître comme des nuances assez floues, elles n'en existent pas moins, et elles sont même très révélatrices des orientations profondes de l'esprit, et par conséquent des tendances que l'on doit s'attendre à retrouver dans tout processus de connaissance. Nous avons vu au début du chapitre III que la notion de fonction met surtout l'accent sur l'ensemble des actions réiproques qui se produisent entre les objets considérés. La fonction d'un système *A* dans un environnement donné tient compte simultanément du rôle que joue *A* vis-à-vis de l'environnement, et des modifications que *A* peut subir du fait même de cet environnement. Ce n'est qu'à titre d'inclusion marginale, et pour aboutir à un contenu exhaustif, que la notion de fonction appliquée à un objet tel que le système *A* contient aussi les propriétés intrinsèques de ce système, c'est-à-dire ce qui, dans

son comportement, ne dépend pas de l'environnement. Au contraire, la notion de signification considérée là où elle prend son origine, c'est-à-dire dans les interactions faisant intervenir l'esprit, apparaît plutôt centrée sur le cas particulier correspondant aux propriétés intrinsèques. Dans la signification accordée à un objet *A* par l'esprit qui en prend connaissance, on constate surtout l'action de l'objet sur l'esprit et non pas l'inverse. Les caractéristiques propres de l'esprit interviennent bien entendu dans la représentation que nous nous faisons de l'objet, mais il ne s'agit pas là à proprement parler d'une action de l'esprit sur l'objet, mais bien plutôt d'une mise en forme particulière de ce qui nous provient de l'objet. Dans la mesure où la signification, dans son lien étroit avec la connaissance, implique aussi l'interdépendance ou la comparaison des objets que l'esprit conçoit ou perçoit, on peut dire que cette démarche n'intervient qu'en second lieu, après la considération de chacun des objets en cause. La place prééminente ainsi accordée aux caractéristiques intrinsèques de chaque objet, c'est-à-dire à son « être », se retrouve en réalité dans tout processus cognitif et semble donc bien correspondre à une constante de l'esprit. Dans un tel processus il existe toujours une étape dans laquelle on est conduit à distinguer divers objets et à dire ce qu'ils sont, les interactions entre ces objets apparaissant ensuite comme liées à l'existence des êtres ainsi définis, comme trouvant leur origine dans ces êtres mêmes. On pourrait croire qu'il s'agit là d'une démarche exclusivement réservée à la métaphysique, mais il n'en est rien car le même type d'opération se retrouve dans toute démarche scientifique. Tout ce qui a été dit jusqu'à présent sur l'étude des éléments et des systèmes le montre à l'évidence, l'étape où les phénomènes se traduisent comme trouvant leur source dans des êtres distincts correspond ici aux opérations de partition en éléments et de définition des classes-repères. Il existe surtout deux différences importantes entre la démarche métaphysique et la démarche scientifique. Elles résident, d'une part dans le fait que la première définit ses objets *a priori*, ou presque *a priori*, et déduit ensuite les interactions entre eux tandis que la seconde n'opère presque *a priori* que pour la partition en éléments et ne définit ses objets qu'à partir de l'observation des interactions ; d'autre part dans le fait que les définitions métaphysiques sont exhaustives, alors que les définitions scientifiques sont seulement fonctionnelles. Mais dans les deux cas on retrouve tôt ou tard un schéma dans lequel ce qui caractérise la notion d'être, et qui s'exprime par un certain nombre de données constantes, apparaît comme l'origine ou tout au moins comme le précurseur des phénomènes, c'est-à-dire de ce qui est variable. En d'autres termes on peut dire que tout phénomène, nécessairement décrit par un certain nombre de données variables, n'est exprimable qu'à partir d'un substratum de données invariables. Ces dernières ne correspondent d'ailleurs pas obligatoirement à des paramètres qui resteraient effectivement constants au cours des changements que subit l'élément ou le système réel considéré. Elles peuvent ne constituer en fait que des

données indispensables à la description intelligible de ce que l'on étudie, comme c'est le cas pour les classes-repères d'un système. Mais on retrouve sous une autre forme la mise en œuvre du même principe dans la recherche des invariants, c'est-à-dire des paramètres ou des assemblages de paramètres restant effectivement constants au cours des phénomènes, et auxquels la science moderne reconnaît la plus grande importance. En définitive, le schéma qui attribue à un ensemble de données constantes un rôle directeur vis-à-vis des données variables correspondant aux phénomènes, apparaît bien comme tout à fait fondamental. Sans doute faut-il voir là l'expression d'une des caractéristiques essentielles de l'esprit dans ses démarches cognitives ; il serait alors normal d'en retrouver l'empreinte plus ou moins nette, plus ou moins précise, dans les divers domaines de la connaissance humaine. C'est bien effectivement ce que l'on peut observer, comme nous allons le voir maintenant. L'examen attentif des formes sous lesquelles peut se traduire cette tendance profonde de l'esprit est évidemment du plus grand intérêt, car il peut conduire à des conclusions utiles sur la validité de tel ou tel langage scientifique, et il peut même présenter une certaine valeur heuristique par les échanges qu'il suggère entre des domaines appartenant traditionnellement à des disciplines différentes.

Revenant maintenant au problème de l'interaction des systèmes, la question se pose de savoir quelles sont les données qui, appartenant aux systèmes, permettent d'exprimer les interactions qui se produisent entre eux. En toute rigueur on peut dire qu'une théorie complète des phénomènes, qualitative et quantitative, exige la prise en considération de toutes les données servant à définir les systèmes en présence, telles qu'elles ont été précisées au chapitre II. Mais si l'on se contente d'une approche moins complète, et en particulier d'une simple estimation qualitative, il ne sera plus nécessaire de prendre en compte la totalité de ces données. Dans le cas des systèmes matériels, nous avons vu que les données contenues dans le concept de structure totale permettent une telle estimation. Nous pouvons constater maintenant que ce concept ne contient plus aucun des paramètres variables qui interviennent dans la définition complète des systèmes, qu'il s'agisse du nombre d'éléments contenus dans chaque classe-repère ou des grandeurs associées aux fonctions d'interaction. La structure totale correspond, au moins en première approximation, à un ensemble de données que l'on considère comme constantes ; admettons pour le moment cette première approximation, avant de voir dans le prochain chapitre ce que l'on peut dire des variations possibles de la structure. Il faut remarquer aussi que la structure totale tient compte d'une certaine manière du fait, déjà signalé, selon lequel un bon nombre d'interactions entre systèmes matériels ne seraient pas possibles si ces systèmes étaient dans un état d'équilibre statique. Nous avons vu en effet que la dynamique correspondant aux transferts d'éléments entre les différentes classes-repères des systèmes en présence était susceptible de jouer un rôle important

dans ces interactions, et en particulier dans celles qui se produisent sans échanges de matière. On peut donc dire que la structure totale, qui comporte les données relatives à l'existence des relations entre classes-repères, c'est-à-dire à la possibilité de ces transferts d'éléments, tient compte implicitement de ce fait, même si cela ne correspond pas à une information aussi riche et aussi précise que celle qui est contenue dans la définition complète des systèmes. Ainsi, le concept de structure totale, associé à celui de fonction, apparaît bien comme une illustration du couple « paramètre constants-phénomènes » dont nous venons de souligner le caractère très fondamental dans toute démarche cognitive. Il est assez vraisemblable que la fortune que connaît l'expression « relations structure-fonction » trouve précisément son origine dans la parfaite adéquation qu'elle présente par rapport aux tendances profondes de l'esprit. La prudence scientifique exige toutefois de ne voir là qu'une constatation, et non un jugement de valeur. Il est utile en effet de rappeler, une fois encore, que le problème des interactions des systèmes matériels ne peut être traité de manière rigoureuse, qualitativement et quantitativement, qu'à partir de la définition complète des systèmes et non pas seulement de leurs structures. Mais il est certainement bon également de rester attentif à ce qui semble provenir du travail naturel de l'esprit, et qui peut contenir certaines intuitions profondes. Il nous reste donc maintenant à compléter les données recueillies à ce sujet dans l'étude des systèmes matériels, par un examen de même type appliqué au problème des interactions des systèmes abstraits.

Nous avons vu qu'au niveau des systèmes abstraits, la notion de fonction se confond pratiquement avec celle de signification. Dire que des systèmes abstraits interagissent revient donc à dire que la signification de chacun d'eux, pour le tiers système que constitue l'esprit qui les perçoit, est influencée ou modifiée par la présence des autres.

Considérons d'abord le cas des systèmes abstraits imposés. On retrouve à leur propos des notions analogues à celles qui ont été développées pour les systèmes matériels. En particulier, on constate que l'existence des interactions est ici encore liée dans une certaine mesure à la proximité des systèmes. Cette notion de proximité doit évidemment être entendue dans un sens tout à fait général, et pas seulement au sens de voisinage spatial. La proximité peut avoir trait à des voisinages de caractéristiques quelconques appartenant à l'espace de configuration servant à définir les systèmes en présence ; elle dépend par conséquent de la nature de ces systèmes. Par exemple, deux phrases *A* et *B*, qui sont des systèmes dont les éléments sont des mots, peuvent interagir différemment selon la proximité de leur énoncé dans le temps, et selon la proximité de signification des mots qui les constituent. On peut même envisager la création d'un système unique, c'est-à-dire d'une phrase unique, par une fusion convenable de l'ensemble des mots constitutifs des deux phrases initiales ; ce serait alors l'équivalent de ce que nous avons rencontré sous le nom

d'interactions avec échanges de matière dans le cas des systèmes matériels. Les mêmes choses pourraient être dites si, au lieu d'être des phrases, les systèmes *A* et *B* étaient par exemple des thèmes musicaux, les éléments constitutifs étant alors des notes.

On retrouve également pour les systèmes abstraits le fait que la nature des éléments constitutifs des systèmes en présence joue un rôle important dans l'existence et dans la nature des interactions possibles entre ces systèmes. Pour reprendre les exemples précédents, il est clair que les interactions, les interférences de signification entre les phrases dépendent dans une large mesure du contenu des mots qui composent respectivement ces phrases, et de la proximité directe ou indirecte des caractéristiques qui servent à les définir. Les caractéristiques qui définissent les notes jouent un rôle identique en ce qui concerne l'interaction des thèmes musicaux. Dans les deux cas, les caractéristiques attribuées aux mots et aux notes constituent en fait les données servant à définir les classes-repères utilisées pour la description des systèmes, phrases ou séquences musicales. Des considérations analogues pourraient évidemment être développées à propos d'autres catégories de systèmes abstraits.

Les exemples qui viennent d'être évoqués permettent apparemment de conclure que, pour les systèmes abstraits comme pour les systèmes matériels, la structure qui intervient dans les rapports structure-fonction est bien la structure totale des systèmes en présence et pas seulement leur structure relationnelle, la nature des éléments constitutifs de ces systèmes jouant dans les interactions un rôle qui ne peut être négligé. Mais il est nécessaire d'examiner cette question d'un peu plus près. Nous n'avons considéré jusqu'à présent que le cas où les éléments appartenant respectivement aux divers systèmes présentent des voisinages de caractéristiques suffisamment importants pour que leurs interférences apparaissent clairement. Que se passe-t-il maintenant si les différences entre ces éléments s'accroissent et, à la limite, si ces éléments deviennent tout à fait étrangers les uns aux autres ? On constate que les interactions directes entre les éléments semblent alors s'estomper petit à petit, en ne mettant en jeu dans chaque cas que les caractéristiques les plus voisines. L'intensité, et même la nature, de ces interactions peuvent ainsi subir des modifications très importantes. Par exemple, les interférences susceptibles de se produire entre des phrases composées respectivement de mots qui présentent des voisinages de significations propres permettant de les mettre aisément en relation, apparaissent d'une autre nature que lorsque ces mots n'ont entre eux que des voisinages de sonorité. De même, les interactions entre un thème musical et une phrase mettent en jeu des caractéristiques différentes de celles qui interviennent dans les interactions entre des phrases. Mais, au fur et à mesure que les éléments constitutifs des systèmes en présence deviennent plus étrangers, ce qui entraîne un affaiblissement progressif des interactions directes entre eux, il semble qu'un autre type d'interaction puisse être mis en évidence, touchant

cette fois aux seules données qui définissent les structures relationnelles des systèmes en cause. Les exemples précédents, et en particulier celui qui concerne les interactions entre un thème musical et un thème verbal, laissent déjà pressentir ce fait. On sait aussi que le langage poétique, surtout dans la versification, met à profit un phénomène analogue par l'usage qu'il fait du rythme, qui est bien une caractéristique de structure relationnelle des phrases, alors que le jeu des sonorités verbales appartient plutôt aux interactions du premier type, c'est-à-dire aux interactions directes entre éléments. Mais il est possible de trouver des exemples plus explicites encore. Dans l'approche des œuvres d'art formel, peinture et sculpture, et plus encore dans la perception psychologique des symboles et des récits mythiques, il semble que le même phénomène intervienne avec une grande netteté. D'après les observations des ethnologues et des psychologues, les interactions entre ces systèmes au niveau des opérations de l'esprit qui les perçoit dépendent essentiellement des structures relationnelles des systèmes en cause, les caractéristiques de leurs éléments constitutifs étant pratiquement indifférentes.

En définitive on peut dire que pour les systèmes abstraits imposés tout se passe comme si, à côté d'interactions dépendant des structures totales des systèmes, existaient aussi d'autres interactions non relevant que des structures relationnelles. Peut-être pourrait-on appeler les premières, des « interactions fortes », et les secondes des « interactions faibles », puisqu'il semble que celles-ci deviennent surtout décelables lorsqu'elles ne sont pas masquées par celles-là, c'est-à-dire lorsque les éléments constitutifs des systèmes sont de natures suffisamment différentes pour ne pas donner lieu à des interactions directes entre eux. On pourrait dire aussi que si la proximité des caractéristiques des systèmes intervient dans la possibilité d'existence des interactions entre ces systèmes, et si ce facteur doit d'abord être pris en compte au niveau des éléments constitutifs, il doit l'être aussi au niveau des structures relationnelles propres aux divers systèmes en présence. Nous n'avons rien trouvé de semblable dans l'étude des systèmes matériels. Dans l'état actuel des connaissances il ne semble pas que des interactions du second type, c'est-à-dire ne faisant intervenir que les structures relationnelles des systèmes en cause, aient jamais été mises scientifiquement en évidence sur des systèmes matériels quels qu'ils soient.

Ainsi, au niveau des activités de l'esprit, le concept de structure relationnelle joue un rôle important, et cette importance s'accroît même au fur et à mesure que l'esprit est plus dégagé des contraintes extérieures et qu'il opère, pourrait-on dire, davantage selon ses lois propres. Cette situation apparaît déjà clairement lorsque l'on passe de l'étude des systèmes matériels à celle des systèmes abstraits imposés. L'examen des différents types de systèmes abstraits imposés la confirme, puisque le rôle accordé à la structure relationnelle devient d'autant plus grand que les systèmes considérés se rapportent à des domaines plus éloignés de ce que l'on peut malgré tout appeler la

réalité extérieure à l'homme. C'est ainsi que ce rôle apparaît plus faible dans le langage courant qui contient, par la définition des mots, un substratum de données extérieures, c'est-à-dire objectives, que dans la perception psychologique des symboles qui correspond à une activité plus intérieure, plus subjective, de l'esprit. Mais sans doute serait-il préférable dans ce dernier cas de parler d'une activité spécifique de l'esprit, plutôt que d'une activité subjective qui suggère inévitablement l'antinomie classique avec la notion de vérité scientifique. On ne peut pas dire en effet que l'importance accordée à la structure relationnelle résulte uniquement de l'activité subjective dans ce que celle-ci peut avoir de contradictoire avec l'activité objective et rationnelle de l'esprit. Il est évident qu'il peut y avoir dans certains domaines contamination de la seconde par la première, mais cela ne justifie évidemment pas le rejet en bloc de tout ce qui n'appartient pas *a priori* totalement exempt de cette contamination. A ce prix, il faudrait éliminer ou considérer comme non avenues la plupart des activités de l'esprit, y compris bien entendu une grande partie des activités scientifiques. La nécessité qui s'impose est plutôt d'essayer dans chaque cas de discriminer aussi clairement que possible ce qui peut être considéré comme objectif et rationnel, et ce qui ne peut être que constaté et non expliqué. Le cas des systèmes abstraits construits, va nous permettre de tenter cette analyse pour le problème qui nous préoccupe ici.

Considérons le cas des systèmes abstraits construits, tels que ceux que l'on rencontre en Mathématique. L'importance accordée à la structure relationnelle est alors plus grande encore qu'elle n'était pour les systèmes abstraits imposés, au point même de devenir pratiquement exclusive de toute autre donnée. Un système mathématique est en fait entièrement défini par sa structure relationnelle interne. Et pourtant si nous nous trouvons ici devant une activité spécifique de l'esprit, nous sommes bien aux antipodes de ce qu'il est convenu de classer sous la rubrique des activités subjectives. Mais une autre constatation s'impose simultanément. Le glissement de sens que subit le concept de fonction lorsqu'on l'applique successivement aux systèmes matériels et aux systèmes abstraits imposés, s'accroît encore dans le passage aux systèmes abstraits construits. Et il en est de même, bien entendu, du concept d'interaction qui est étroitement lié à celui de fonction. Pour les systèmes matériels, les interactions se traduisent par des changements dans les classes-repères et dans les relations entre classes utilisées pour la description des divers systèmes en présence ; et ces changements peuvent être très profonds, surtout lorsqu'il se produit des échanges de matière. Dans bien des cas, les transformations sont telles qu'il est impossible, au seul vu des résultats de l'interaction, de savoir quels étaient les systèmes en présence avant l'interaction, que l'on songe, par exemple, aux réactions chimiques irréversibles. Pour les systèmes abstraits imposés, une situation analogue peut éventuellement se rencontrer, lorsque nous opérons volontairement le mélange des éléments appar-

tenant aux systèmes en présence, par exemple le mélange des mots de plusieurs phrases ou de plusieurs ensembles de phrases. Mais la plupart du temps, les interactions se traduisent seulement par des interférences de significations, chaque système conservant un substratum de caractéristiques que l'on peut considérer comme lui appartenant en propre, c'est-à-dire que l'on retrouverait si le système était isolé ou, si l'on préfère, que l'on retrouverait quel que soit l'environnement dans lequel peut être placé ce système. Ce type d'interaction, dans lequel les systèmes en présence conservent une part importante de leurs caractéristiques propres, semble traduire une règle d'autant plus générale que les systèmes considérés correspondent à des activités plus spécifiques de l'esprit. Dans la perception psychologique des symboles et des récits mythiques, chaque système est en général reconnaissable dans l'ensemble auquel il participe, et l'on peut même dire que toute « explication » dans ce domaine de la psychologie résulte précisément de la possibilité d'identifier un certain nombre de systèmes plus ou moins standard que l'on retrouve dans tous les ensembles complexes que rencontre le psychologue ou l'ethnologue. Ces systèmes standard sont en quelque sorte les mots d'un langage intérieur, et les spécialistes admettent que la signification essentielle de chacun de ces systèmes, d'où résultent les fonctions qu'il remplit, réside dans sa structure relationnelle interne. Si l'on considère enfin le cas des systèmes abstraits construits, la notion d'interaction entre systèmes s'estompe encore jusqu'à disparaître. On ne peut plus guère parler ici, au niveau des opérations de l'esprit, que de la comparaison de divers systèmes, et l'on conviendra que la comparaison est une forme bien atténuée de l'interaction. En Mathématique, chaque système étudié est défini par sa structure relationnelle interne, d'où découlent ses propriétés. Mais il faut noter que ces propriétés sont les propriétés intrinsèques du système, et que celui-ci est entièrement défini par sa structure relationnelle, ce qui explique que l'on ait coutume de parler de structure mathématique au lieu de système mathématique. Rappelons au passage que si cette confusion entre les concepts de structure et de système se justifie en Mathématique, pour les raisons qui viennent d'être dites, elle n'est pas en général légitime, comme nous l'avons vu abondamment depuis le début de cette étude. Si l'on considère maintenant divers systèmes mathématiques, on voit immédiatement que la notion d'interaction entre eux n'a en réalité aucun sens, contrairement à ce que nous avons constaté à propos des systèmes abstraits imposés et des systèmes matériels. On peut appliquer à un même ensemble d'éléments abstraits diverses structures relationnelles et en étudier les propriétés, mais on se trouve dans chaque cas devant un système considéré isolément et dont la structure est parfaitement définie. La Mathématique ne s'intéresse en somme qu'aux propriétés intrinsèques que possède un système abstrait, en conséquence de sa structure relationnelle interne. Mais la genèse de nouvelles structures, provoquée par l'interaction progressive de systèmes initialement séparés, n'est pas dans l'ordre de ses préoccupa-

tions propres, et cela résulte précisément du fait que la notion d'interaction entre systèmes se trouve vide de sens lorsqu'on cherche à l'appliquer aux systèmes abstraits que construit la Mathématique. Il y a là une différence essentielle par rapport aux systèmes matériels et systèmes abstraits imposés, pour lesquels la notion d'interaction entre systèmes est riche de sens et revêt une très grande importance. Cela ne veut pas dire, bien entendu, que la Mathématique ne permette pas de traiter les problèmes d'interaction qui se présentent à propos des systèmes matériels et des systèmes abstraits imposés. Ce serait évidemment absurde, et contraire au rôle prépondérant que cette science a joué et joue de plus en plus dans notre connaissance du monde. Mais, entre l'objet propre de la mathématique et l'utilisation qui est faite de celle-ci dans l'étude de problèmes concrets, il se produit une transposition très importante. En mathématique, les objets considérés n'interviennent qu'en fonction des opérations auxquelles on les soumet ; ils ne sont même définis que par l'existence de ces opérations et ils peuvent par conséquent être considérés *a priori* comme dénués de toute signification pratique particulière. De là résulte la possibilité d'étudier en elles-mêmes les propriétés de telle ou telle catégorie d'opérations, indépendamment des éléments réels auxquels elles peuvent s'appliquer. En dernier ressort, la mathématique est l'étude des propriétés intrinsèques des structures relationnelles pures, considérées en elles-mêmes et abstraites de tout contexte particulier. Au contraire, dans l'étude des systèmes matériels et des systèmes abstraits imposés, on se trouve en présence d'objets, éléments ou systèmes, dont les fonctions existent *a priori*. Les définitions que nous donnons de ces objets ne sont pas entièrement libres ; elles doivent respecter les fonctions observées. Notre liberté toute relative est limitée, comme nous l'avons vu, aux choix initiaux qui président à la partition en éléments et en systèmes de la partie du monde que nous voulons étudier. On conçoit que, selon ces choix, nous retrouvions ensuite des interactions aussi bien entre des éléments définis globalement qu'entre des systèmes constitués chacun de tels éléments. En mathématique cette situation ne peut pas se présenter puisque chaque système est volontairement construit, à partir d'une axiomatique que l'on se fixe, et dont on déduit ensuite les conséquences logiques qui constituent les propriétés intrinsèques du système. La construction ou l'étude simultanée de plusieurs systèmes mathématiques, entre lesquels on n'a pas établi *a priori* un lien sous la forme d'une opération quelconque, ne peut avoir que le sens d'une prise en considération simultanée de plusieurs systèmes indépendants ; elle ne peut en tout cas avoir le sens d'une interaction entre ces systèmes. Et si ce lien est établi par un choix initial délibéré, on n'a plus affaire à plusieurs systèmes mais à un seul. Dans l'étude des systèmes matériels et des systèmes abstraits imposés, la détermination initiale des systèmes théoriques de référence, classes-repères et liaisons entre ces classes, est faite à partir des considérations qui viennent d'être rappelées et qui traduisent les phénomènes observés. La ségrégation de divers

systèmes, ou au contraire leur dépendance sous la forme d'interactions, nous est imposée par les phénomènes auxquels sont soumis ces systèmes. Après cette étape, nous n'avons plus affaire qu'à un ou plusieurs systèmes indépendants puisque chaque ensemble de systèmes en interaction ne constitue plus alors qu'un système unique, du fait des liaisons établies entre eux. Comme nous le verrons de manière plus détaillée dans le prochain chapitre sur l'évolution, nous nous trouvons alors pour chacun des systèmes indépendants devant un problème de propriétés intrinsèques, avec le rôle prépondérant qu'y joue la notion de structure relationnelle. Et c'est précisément à ce stade qu'intervient en pratique la mathématique, conformément à son objet propre.

Nous pouvons maintenant faire la synthèse des données recueillies sur les interactions des différents types de systèmes, sur le sens qui en découle pour les propriétés et les fonctions de ces systèmes, et sur la place qu'y tient la notion de structure dans les deux acceptions que nous avons retenues au chapitre II.

La première constatation qui s'impose est que l'importance accordée à la notion de structure relationnelle semble bien être étroitement liée à la nature même des activités de l'esprit. Mais la signification qui est donnée à ce concept varie de manière sensible selon le domaine auquel on l'applique.

Au niveau de la pensée la plus rigoureuse et la plus rationnelle, appliquée aux systèmes abstraits construits, la structure relationnelle d'un système considéré isolément apparaît comme exprimant l'essentiel des propriétés intrinsèques du système. Selon le point de vue auquel on se place, on pourrait dire qu'elle représente une donnée ontologique ou qu'elle constitue une description qualitative de la nature du système.

L'étude des systèmes matériels, menée rationnellement à partir de notre connaissance actuelle des lois de la nature, aboutit à une conclusion quelque peu différente. En effet, nous savons déjà que la structure relationnelle ne contient pas l'ensemble des données nécessaires à la définition complète d'un tel système. Nous avons vu également que, lorsqu'il s'agit de déterminer la possibilité et la nature des interactions entre systèmes matériels, la structure relationnelle ne suffit plus, et qu'il faut la remplacer par la notion de structure totale si l'on veut parvenir à une estimation qualitative des interactions, et même par la définition quasi exhaustive des systèmes en présence si l'on veut effectuer une étude complète, qualitative et quantitative, des interactions. Mais la structure relationnelle correspond encore, pour un système matériel supposé isolé, à une caractéristique importante de ce système, même si elle ne le définit pas entièrement. Nous verrons dans le prochain chapitre, consacré à l'évolution, que cette structure relationnelle permet de prévoir quelles sont les caractéristiques susceptibles de varier dans un système isolé ; elle permet en particulier de savoir si la structure totale et la structure relationnelle d'un tel système constituent des invariants.

L'étude des systèmes abstraits imposés ne permet pas de tirer des

conclusions aussi générales, ni même souvent aussi claires. Sans doute faut-il voir là l'effet des interférences plus fortes qui interviennent dans ce domaine entre ce qui provient de notre esprit et ce qui nous est imposé de l'extérieur par la préexistence des systèmes. La séparation des données, selon ces deux sources, présente la plupart du temps des difficultés considérables et même insurmontables. Pour certains systèmes abstraits imposés les conclusions obtenues à propos des systèmes matériels restent apparemment valables, et en particulier celle qui a trait à la nécessité de connaître au moins la structure totale des systèmes en présence pour pouvoir déterminer les possibilités d'interaction entre eux. On rencontre ce cas, par exemple, dans une étude « naïve » de l'interaction des significations entre les phrases d'un texte. La structure relationnelle interne de chacune des phrases ne suffit pas pour expliquer ces interactions ; il faut pour cela faire intervenir également les caractéristiques des mots constitutifs de chaque phrase, c'est-à-dire des éléments constitutifs de chaque système. Mais si l'on aborde le même problème à l'aide de méthodes plus élaborées, telles que celles qu'utilise la linguistique moderne, certains phénomènes nouveaux semblent se révéler dans lesquels la structure relationnelle acquiert une signification plus large que celle que nous rencontrons dans l'étude des systèmes matériels et des systèmes abstraits construits. Tout se passe comme si la structure relationnelle n'était plus uniquement liée aux propriétés intrinsèques du système qu'elle caractérise en partie, et comme si certaines interactions entre systèmes n'étaient conditionnées que par les structures relationnelles internes de ces systèmes. La notion de fonction associée à la structure relationnelle subit alors une extension qui ne paraissait possible qu'en association avec la structure totale. Les systèmes abstraits imposés pour lesquels apparaît cette situation touchent à des domaines très divers, qu'il s'agisse de la psychologie de la Forme, de l'appréhension des œuvres d'art formel, de la perception psychologique des symboles et des mythes, ou des études modernes en linguistique et en ethnologie. Faut-il rappeler la remarque célèbre de Paul Valéry, à propos de la poésie de Mallarmé, et selon laquelle « le fond n'est qu'une forme impure » ? On sait que cette veine a été depuis largement exploitée, parfois même jusqu'à l'absurde apparemment, du surréalisme au lettrisme, de la peinture abstraite à la musique atonale. On dirait que l'homme présente et cherche, relativement aux structures relationnelles pures, quelque chose que cacherait le « fond », celui-ci correspondant en définitive aux caractéristiques spécifiques des éléments constitutifs des systèmes que l'on étudie. Cette tendance semble très ancienne et très constante dans l'histoire de l'homme, puisqu'on la trouve déjà dans ce que l'on considère comme l'une des premières étapes de l'activité de l'esprit, la mentalité magique. L'une des caractéristiques essentielles de la mentalité magique est en effet de considérer que les objets du monde interagissent selon leurs formes pures, qu'il s'agisse de leurs formes spatiales directement observables, ce qui correspond à une partie de leurs structures relationnelles pro-

pres, ou qu'il s'agisse de caractéristiques formelles plus profondes. Nous trouvons ici l'extension maximum de la signification accordée à la structure relationnelle, dont le rôle directeur pour toutes les interactions ne s'étend plus seulement aux systèmes abstraits imposés mais aussi au monde matériel. A notre époque, le souci de se ramener en dernier ressort à des structures relationnelles apparaît clairement avec le concept d'information, utilisé dans les sciences les plus exactes touchant également au monde matériel. Le codage informatique n'est rien d'autre, en effet, que la transcription d'un système quelconque en un autre système qui se réduit pratiquement à sa seule structure relationnelle interne, c'est-à-dire dans lequel les éléments constitutifs ne sont plus différenciés que par les relations auxquelles ils sont soumis entre eux.

Ainsi, l'importance de la structure relationnelle apparaît partout où l'esprit intervient, comme sujet ou comme objet et objet de connaissance. Mais, alors que cette notion joue, au niveau de l'activité purement rationnelle, un rôle précis et limité touchant aux propriétés intrinsèques des systèmes, le rôle qu'elle remplit dans les autres domaines s'étend plus ou moins pour atteindre à la limite celui d'une caractéristique qui conditionnerait, non seulement les propriétés intrinsèques, mais d'une manière générale l'ensemble des fonctions que peuvent remplir les systèmes considérés, y compris les interactions avec d'autres systèmes. Ce fait est une simple constatation, et il semble bien difficile de l'expliquer. Tout au plus peut-on faire à ce sujet quelques hypothèses, évidemment diverses selon le point de vue auquel on se place ; nous allons voir maintenant quelques-unes d'entre elles.

Existerait-il dans le monde matériel des interactions ne dépendant que des structures relationnelles mais qui n'appartenaient que pour des systèmes très complexes, leur importance étant liée à ce degré de complexité ? Dans l'affirmative l'homme, par son substratum matériel d'une extrême complexité, serait dans une situation tout à fait propice pour éprouver ou pour percevoir ce type d'interactions, et le mode de fonctionnement de son esprit pourrait en porter la marque. Il est, bien entendu, difficile d'estimer la plausibilité d'une telle hypothèse qui touche à la nature même de la conscience. Pour tenter de l'étayer, on pourrait remarquer qu'au niveau moléculaire les interactions deviennent de plus en plus spécifiques au fur et à mesure que croît la complexité des molécules en présence. Dans les systèmes biologiques, ces interactions semblent souvent dépendre dans une très large mesure de la seule structure relationnelle interne des molécules en présence, comme le montre en particulier l'activité des substances biométriques.

Faut-il penser que cette importance particulière accordée par l'esprit humain aux structures relationnelles pourrait correspondre à une sorte d'intuition profonde sur la constitution ultime de l'Univers, correspondant à la limite asymptotique vers laquelle on tendrait si l'on poursuivait l'analyse de plus en plus fine des systèmes sous-

jacents aux éléments constitutifs des systèmes ? Cette limite ultime correspondrait-elle à des éléments constitutifs de plus en plus ténus, à quelque chose comme la *matéria prima* des scolastiques, matière sans structure, dénuée de propriétés spécifiques ? Si cela était, les propriétés de tout système matériel dépendraient en dernier ressort de sa *structure relationnelle complète*, c'est-à-dire de l'ensemble imbriqué des structures relationnelles correspondant à tous les niveaux de description possibles (1). Notons au passage que l'assertion de Valéry disant que « le fond n'est qu'une forme impure » apparaît tout à fait conforme à cette hypothèse. Cela n'empêcherait pas bien entendu d'avoir à prendre en compte en pratique, pour les interactions entre systèmes matériels, les *structures totales* de ces systèmes puisqu'au niveau de description n'atteindrait jamais la limite extrême, vraisemblablement inaccessible en pratique. On remarquera qu'une telle hypothèse ne serait sans doute pas contredite par l'existence de particules élémentaires très « ténues », comme le neutrino et le graviton, dont on sait que les interactions avec les systèmes matériels sont extrêmement faibles.

En se plaçant enfin dans l'optique d'une critique purement rationnelle, on pourrait admettre que la seule signification légitime accordée à la notion de structure relationnelle d'un système est celle qui l'associe, comme en mathématique, aux propriétés intrinsèques de ce système. Toute extension du rôle attribué à la structure relationnelle, en particulier en ce qui concerne l'ensemble des propriétés incluses dans la notion générale de fonction, serait abusive et pourrait provenir de ce que les psychologues appellent des phénomènes de projection. L'esprit humain attribuerait ses propres modes de fonctionnement au monde extérieur. Dans la même optique, mais dans un ordre qui correspond sans doute mieux à l'évolution historique, on pourrait dire que la mentalité magique traduit une intuition de ce que deviendront plus tard les opérations les plus élaborées de la conscience, et de l'importance qu'y prendront les relations entre objets. Le décalage de sens que subit dans une telle intuition le couple « structure-fonction » peut être considéré comme caractéristique des phénomènes liminaires par rapport à la conscience.

Si l'on admet ces dernières hypothèses, il reste à savoir d'où vient cette tendance de l'esprit qui accorde une importance essentielle aux structures relationnelles. Ici encore il semble qu'on ne puisse apporter qu'une constatation, et non pas une véritable explication. Il est possible que cette tendance généralisée soit la conséquence du principe même selon lequel travaille l'intelligence dont on sait qu'elle opère surtout par mise en relations des objets de l'entendement, par comparaisons, c'est-à-dire en définitive par constatation des identités et des différences. La généralisation, qui est le but de l'activité scientifique,

(1) Le mot *Forme* au sens philosophique ancien (cf. Chap. II) correspond en fait à cette structure relationnelle complète, ce qui explique que lui soit associé l'ensemble des propriétés du système que constitue un objet quelconque.

revient à mettre l'accent sur les identités. Si les types fondamentaux de structures relationnelles possibles sont moins divers que les types d'éléments que ces structures associent, comme il apparaît de plus en plus clairement, il est alors normal que la recherche et l'étude des structures relationnelles constituent le pôle le plus constant de toute démarche cognitive.

Les hypothèses qui viennent d'être résumées ne sont certainement pas les seules possibles. Mais peu importe que l'on puisse en ébaucher ainsi un nombre plus ou moins grand puisque leur validité ne semble pas être entièrement vérifiable dans l'état actuel des connaissances. Il était cependant utile d'en énoncer quelques-unes afin de montrer sur quels problèmes très fondamentaux s'ancre la notion de structure, particulièrement dans ses rapports avec la notion de fonction.

D'un point de vue pratique, il est surtout nécessaire de retenir des discussions qui précèdent la grande importance que revêt le contenu précis des concepts de structure et de fonction lorsqu'on les associe. Cette nécessité est d'autant plus grande que l'on cherche à élaborer des théories plus rigoureuses, adaptées à un meilleur approfondissement des lois qui gouvernent l'interaction des divers systèmes dans le monde qui nous entoure. La connaissance du contenu exact des concepts utilisés n'est pas requise uniquement par le souci de clarté. Elle a aussi et surtout une incidence directe sur le pouvoir heuristique des théories que l'on construit puisque, comme nous venons de le voir, la nature même des interactions observées peut être très différente selon les caractéristiques de structure qui les conditionnent effectivement.

Nous pouvons maintenant, pour terminer ce chapitre, revenir brièvement sur une question abordée au chapitre II et qui ne pourrait être entièrement éclaircie avant d'avoir étudié la notion de fonction. Il s'agissait de savoir dans quelle mesure les concepts de forme et de structure pouvaient être confondus. L'analyse faite au cours du chapitre III nous permet de répondre à cette question. Puisque la forme au sens philosophique ancien correspond à une description partielle de l'être d'un système et des propriétés qui en découlent, ce concept peut être assimilé d'une manière générale à ce que nous avons appelé la structure totale d'un système. Mais en réalité cette forme est plus voisine encore de la *structure relationnelle complète* du système, c'est-à-dire de la structure relationnelle qui serait atteinte si les éléments constitutifs du système étaient décomposés en sous-systèmes, de proche en proche à tous les niveaux possibles jusqu'à ce que l'on parvienne à des éléments qui ne soient plus eux-mêmes des systèmes. Pratiquement, la *structure relationnelle complète* est équivalente à la *structure totale*, en ce sens que la seconde notion contient implicitement tout ce que contient explicitement la première, mais celle-ci correspond à une limite dont on ne peut pas dire si elle est effectivement accessible en pratique, alors que celle-là correspond à un ensemble de données qui sont toujours définissables quel que soit

le niveau de description choisi. Nous trouvons là une conséquence de l'origine métaphysique du concept de forme. Ce caractère métaphysique transparaît également dans le fait que la forme est considérée comme une caractéristique ayant trait à l'*être réel* du système, tandis que le contenu précis que nous avons retenu pour le concept de structure est toujours relatif à la théorie que nous faisons du système et des phénomènes observés. Et ceci reste vrai quelle que soit la position que nous adoptons en ce qui concerne les rapports possibles entre la théorie et la réalité. La forme apparaît ainsi comme la limite vers laquelle tendrait la structure totale dans une connaissance complète de la réalité, cette notion de réalité pouvant être ramenée en définitive à ce qui serait alors *en droit* observable par tous.

Rappelons enfin, pour mémoire, que la forme au sens restreint correspond à la disposition spatiale des éléments d'un système. La structure relationnelle étant située dans un espace de configuration qui comprend autant de coordonnées que de caractéristiques qualitatives utilisées pour les définitions des classes-repères, et pouvant comporter des aspects de transfert d'éléments, de topologie et d'ordre (cf. chap. II), la forme au sens restreint correspond à la projection dans l'espace habituel à trois dimensions de cette structure relationnelle réduite à ses seuls aspects topologique et d'ordre. Les données relatives aux transferts d'éléments n'interviendraient que dans l'étude de la dynamique de la forme spatiale.

CHAPITRE IV

LA NOTION D'ÉVOLUTION

ÉVOLUTION D'UN SYSTÈME ISOLÉ.

Parmi toutes les caractéristiques qui servent à définir un système, le temps joue un rôle particulier. Il constitue une caractéristique extrinsèque du système, non pas en tant que moyenne intégrée, mais en tant que repère universel valable pour tous les éléments du système. L'évolution correspond aux changements que subissent les diverses caractéristiques du système, rapportés à ce paramètre universel de temps.

On peut envisager que dans certains cas la référence de temps ne soit pas la même pour les différents éléments d'un système, comme cela se produit par exemple lorsque apparaissent les phénomènes dits relativistes. Mais il s'agit là de cas particuliers qu'il n'est pas nécessaire de prendre en considération ici. Il faut d'ailleurs remarquer que de telles circonstances correspondent davantage à une écriture particulière des lois de la nature qu'à une élimination pure et simple de toute référence universelle de temps. En effet, ce que l'on appelle alors le temps propre à chaque élément peut toujours être exprimé en fonction d'une référence universelle de temps, même si cela fait intervenir d'autres caractéristiques liées à la définition des éléments, comme les coordonnées spatiales et les composantes de vitesse et d'accélération. Les divers temps propres apparaissent en définitive comme des caractéristiques supplémentaires nécessaires à la définition des éléments et à l'expression des lois auxquelles ils obéissent. Ils sont le résultat d'une interdépendance entre certaines caractéristiques qui étaient auparavant considérées comme indépendantes, ici l'espace et le temps, mais ils n'entraînent pas la disparition de ces caractéristiques. Notre but n'est pas d'analyser en détail le concept de temps, et le contenu qui lui correspond dans la notion de référence universelle nous suffit. Il est toujours possible d'étudier comment varient les diverses caractéristiques d'un système en fonction de l'une d'entre elles choisie comme référence. L'évolution correspond au cas particulier où cette référence est le temps, quel que soit le contenu plus ou moins précis que l'on donne à ce paramètre, et quelles que soient les relations qui peuvent exister entre lui et les autres caractéristiques du système.

Nous avons vu qu'un système est entièrement défini par un certain nombre de données touchant à l'existence et à la définition des classes-repères, au nombre d'éléments présents dans chacune de ces classes, ainsi qu'à l'existence, la nature, et la grandeur des relations entre ces classes. L'étude de l'évolution du système, ou si l'on préfère de sa dynamique, consistera à préciser comment varient ces diverses données au cours du temps. Mais il n'est pas nécessaire pour cela de considérer séparément chacune des données, car celles-ci ne sont pas toutes indépendantes. Par exemple les problèmes d'existence, des classes-repères d'une part, et des liaisons entre ces classes d'autre part, sont en étroite corrélation, qu'il s'agisse du système théorique ou du système des éléments réels. Dans le premier cas, le choix d'une classe-repère lors de la partition en éléments implique, pour que la théorie soit correcte, l'affirmation d'existence simultanée des liaisons qui touchent à cette classe et qui correspondent aux relations réelles entre les éléments qu'elle peut contenir et ceux que peuvent contenir les autres classes. Dans le second cas, l'existence d'une classe correspond au fait que le nombre d'éléments réels qu'elle contient n'est pas nul. Lorsque ce nombre s'annule, la classe et les liaisons qui la touchent disparaissent simultanément.

Un autre fait est à prendre en considération lorsqu'il s'agit d'évolution. Nous savons que les relations entre les éléments d'un système peuvent correspondre à trois types différents : les relations de transfert, les relations topologiques, et les relations d'ordre. Les relations des deux derniers types constituent des données statiques, et elles ne peuvent donc donner lieu à des phénomènes d'évolution lorsqu'elles existent seules. Pour pouvoir parler de la dynamique d'un système il est donc nécessaire qu'il existe des relations de transfert d'éléments entre les diverses classes-repères. Nous avons donc à considérer en premier lieu ce type de relations pour tout ce qui concerne l'évolution. Il va de soi cependant que l'existence de relations de transfert n'exclut pas l'existence simultanée de relations topologiques et d'ordre, qu'il peut être intéressant d'étudier également. Mais les relations de transfert sont à l'origine de la dynamique du système, et les relations topologiques et d'ordre ne peuvent être modifiées qu'en conséquence des relations de transfert. Lorsque les phénomènes d'évolution cessent, les relations topologiques et d'ordre qui peuvent être mises en évidence dans le système deviennent stables. Nous verrons bientôt un exemple d'étude simultanée de ces trois types de relations dans un même système.

Considérons maintenant un système défini par un certain nombre de classes-repères et par diverses relations de transfert entre ces classes. L'évolution du système réel va se traduire par une variation au cours du temps du nombre d'éléments présents dans chacune des classes-repères. Supposons que le système théorique choisi pour décrire le système réel comporte des classes-repères dont aucune n'est vide au début du processus d'évolution que l'on étudie. Au cours de l'évolution deux cas peuvent se présenter : toutes les classes-repères

peuvent rester occupées, par un nombre variable d'éléments, ou au contraire certaines d'entre elles peuvent se vider, c'est-à-dire ne plus comporter aucun élément au bout d'un certain temps. La distinction entre ces deux situations est importante, car certaines données qui caractérisent le système restent stables dans le premier cas, et varient ou disparaissent dans le second. C'est bien ce qui se produit pour la structure totale et pour la structure relationnelle d'un système, qui sont modifiées lorsque disparaissent une classe-repère et les liaisons qui la touchaient, c'est-à-dire lorsque les éléments réels du système ne peuvent plus se trouver dans l'état représenté par l'une des classes. Nous admettrons pour le moment que les relations issues d'une classe-repère ne peuvent disparaître que si le nombre d'éléments contenus dans cette classe s'annule. Nous verrons plus loin comment les conclusions obtenues à partir de cette condition doivent être modifiées lorsque celle-ci n'est pas réalisée.

La figure 10 représente dans cette hypothèse un certain système au moment où l'on commence à étudier son évolution, chaque classe-repère étant occupée par un nombre non nul d'éléments. On voit que chaque classe est touchée à la fois par des relations dirigées vers elle, qui expriment un apport d'éléments

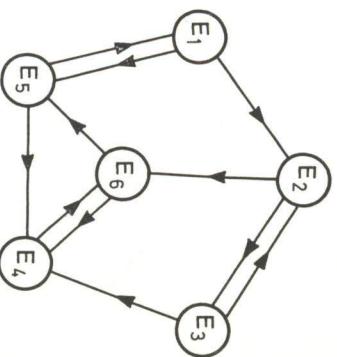


Fig. 10

en provenance d'autres classes, et par des relations dirigées dans l'autre sens, et qui expriment un rejet d'éléments vers les autres classes. Nous appellerons les premières, des relations convergentes, et les secondes des relations divergentes, par rapport à la classe considérée. L'existence simultanée de ces deux types de relations sur chacune des classes-repères montre qu'il ne peut y avoir annulation du nombre d'éléments contenus, dans aucune des classes. L'évolution, qui peut être provoquée par des causes diverses comme, par exemple, la variation de certaines caractéristiques extrinsèques intervenant dans les relations de transfert, va se traduire par une variation du nombre d'éléments contenus dans les différentes classes. Mais l'existence des classes et des relations entre classes n'est pas en cause dans le système réel, et nous avons affaire à ce que l'on peut appeler une *évolution du système à structure constante* ; le terme structure s'appliquant aussi bien à la structure relationnelle qu'à la structure totale.

Toujours avec la même hypothèse de départ, considérons maintenant le système de la figure 11-1, en supposant qu'aucune de ses classes n'est vide au moment où l'on commence à étudier son évolution. Le fait que la classe E_1 ne soit touchée que par des fonctions divergentes par rapport à elle indique que les éléments contenus dans cette

classe vont peu à peu être transférés vers les classes E_2 et E_3 , sans retour possible. Au bout d'un temps plus ou moins long, qui dépend des valeurs des fonctions f_{12} et f_{13} , la classe E_1 sera vide d'éléments et la structure du système réel sera celle qui est représentée sur la figure 11-2. On peut constater sur ce dernier schéma qu'aucune des classes de E_2 à E_6 ne disparaîtra comme E_1 , chacune d'elles étant touchée à la fois par des fonctions divergentes et par des fonctions convergentes.

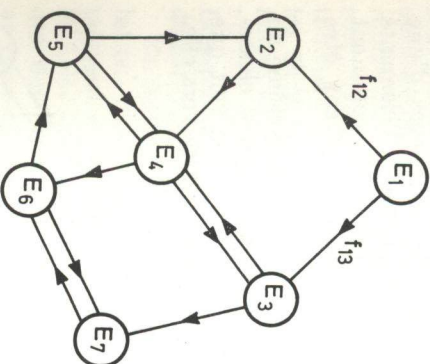


Fig. 11.1

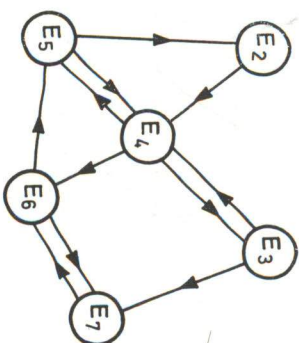


Fig. 11.2

Contrairement au cas précédent, nous avons affaire ici à une *évolution du système à structure variable*, le terme structure s'appliquant aussi bien à la structure relationnelle qu'à la structure totale.

Ce que nous venons de constater sur deux exemples simples peut se retrouver, sous des formes diverses, dans des systèmes de complexité quelconque. On peut d'ailleurs étudier d'une manière tout à fait générale les conditions qui entraînent pour un système quelconque, l'évolution à structure constante ou à structure variable (1). Il est intéressant de résumer brièvement les conclusions auxquelles on parvient dans ce domaine, car nous trouvons là un bon exemple d'étude simultanée de propriétés de transfert, de propriétés topologiques, et de propriétés d'ordre. Mais il faut pour cela rappeler auparavant quelques définitions.

Les schémas qui nous ont servi jusqu'à présent pour représenter les systèmes sont, en fait, ce que l'on appelle en mathématique des *graphes orientés*. Les classes-repères sont les nœuds ou les *sommets* du graphe, et les relations orientées entre les classes sont des *arcs*. Un *chemin* est une succession d'arcs telle que l'extrémité terminale de chaque arc coïncide avec l'extrémité initiale de l'arc suivant.

Une notion importante pour le problème qui nous préoccupe est celle de *connectivité forte*. On dit qu'un graphe est *fortement connexe* si, pour tout couple de sommets E_i et E_j (i et j quelconques), il est possible de trouver un chemin de E_i à E_j et un chemin de E_j à E_i . Les sommets intermédiaires que l'on rencontre sur l'un des chemins peuvent être différents de ceux que l'on rencontre sur l'autre chemin. Une partie d'un graphe, constituée d'un certain nombre de sommets et des arcs qui les relient entre eux, est souvent appelée une *composante* du graphe. Le fait qu'une composante soit *fortement connexe* n'exclut pas qu'il puisse exister des liaisons, des arcs, entre certains sommets appartenant à cette composante et d'autres sommets qui lui sont extérieurs. La figure 12 donne un exemple de deux composantes fortement connexes reliées entre elles par un arc. On a tracé pour chacune des composantes la frontière entourant les sommets qui lui appartiennent; la liaison entre les deux composantes est constituée par l'arc f_{34} . Les deux composantes peuvent être dites *voisines* ou *adjacentes*.

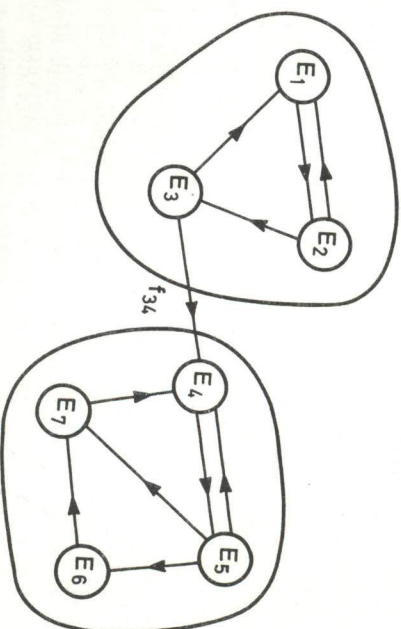


Fig. 12

Il peut arriver que plusieurs composantes fortement connexes, adjacentes les unes aux autres, forment en réalité par leur réunion une composante fortement connexe unique. C'est le cas, par exemple, pour les trois composantes fortement connexes représentées sur la figure 13.

(1) P. Delattre — *L'Évolution des systèmes moléculaires* — Bases théoriques. Applications à la Chimie et à la Biologie. Librairie Maloine, 1971.

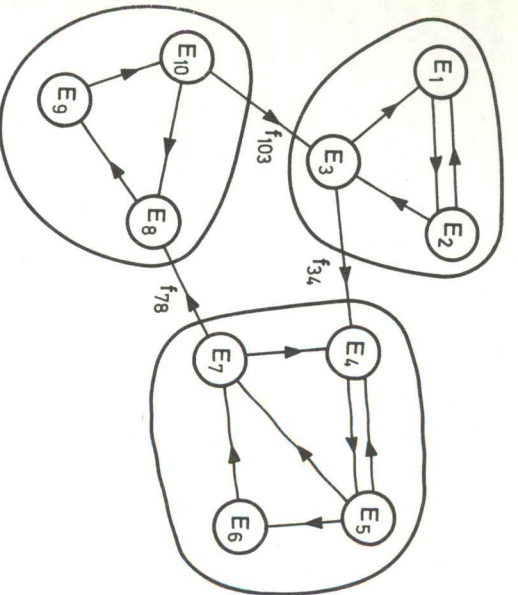


Fig. 13

Nous appellerons *graphe vrai* une composante fortement connexe non susceptible de donner naissance à une nouvelle composante fortement connexe, par l'adjonction d'une ou plusieurs composantes adjacentes. Ceci n'exclut pas, bien entendu, que des graphes vrais puissent être reliés entre eux, mais il n'est pas possible qu'ils forment alors de nouvelles composantes fortement connexes.

Si l'on considère maintenant le sens des arcs traversant la frontière d'un graphe vrai, on constate immédiatement que l'on peut distinguer quatre types de tels graphes. Nous adopterons à ce sujet les définitions suivantes :

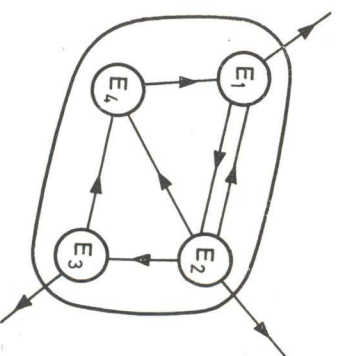
Le Graphe Exotrope Vrai (symbolisé par le sigle GExV), est un graphe vrai dont la frontière n'est traversée que par des arcs divergents par rapport aux sommets du graphe où ils prennent leur origine.

Le Graphe Endotrope Vrai (symbolisé par GENV) est un graphe vrai dont la frontière n'est traversée que par des arcs convergents.

Le Graphe Mixte Vrai (symbolisé par GMV) est un graphe vrai dont la frontière est traversée à la fois par des arcs divergents et par des arcs convergents.

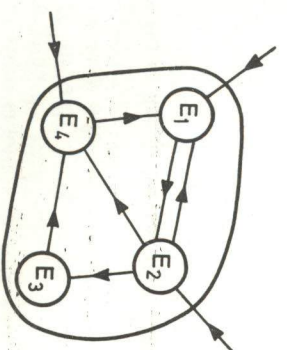
Le Graphe Fermé Vrai (symbolisé par GFV) est un graphe vrai dont la frontière n'est traversée par aucun arc.

Les figures 14 à 17 représentent respectivement ces quatre types de graphes vrais. La composante fortement connexe intérieure à la frontière a été choisie la même dans chacun de ces cas, afin de bien



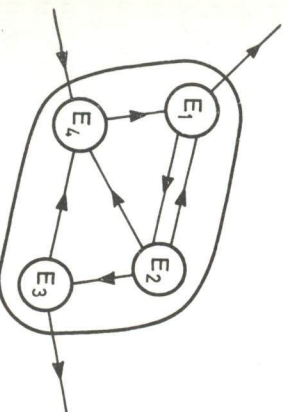
Graphe Exotrope Vrai (GExV)

Fig. 14



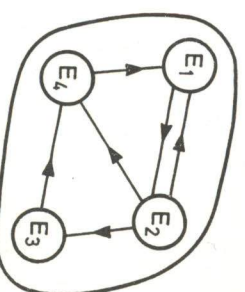
Graphe Endotrope Vrai (GENV)

Fig. 15



Graphe Mixte Vrai (GMV)

Fig. 16



Graphe Fermé Vrai (GFV)

Fig. 17

mettre en évidence le fait que seuls les arcs traversant la frontière interviennent pour distinguer les quatre types de graphes vrais. Mais il est bien évident que cette composante intérieure peut être quelconque, très simple ou très complexe, à la seule condition d'être fortement connexe.

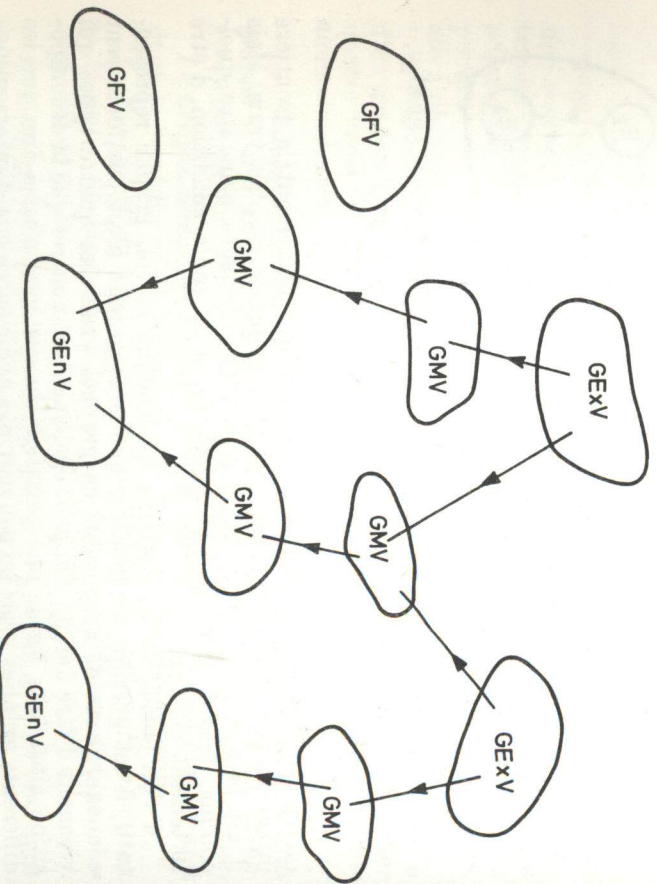
Si l'on considère un système quelconque et son graphe représentatif, il est possible de montrer que si ce graphe n'est pas fortement connexe, il est décomposable en graphes vrais des quatre types qui viennent d'être décrits. On peut également démontrer que la décomposition ainsi faite forme une partition du système, c'est-à-dire que les différents graphes vrais ne peuvent pas avoir entre eux d'intersections non vides, ou encore si l'on préfère, que deux quelconques de ces graphes vrais ne peuvent jamais avoir entre eux de classes-repères communes. On peut enfin montrer que cette décomposition met en évidence dans le système, des chaînes de filiation allant des graphes

exotrope vrais aux graphes endotropes vrais, en passant éventuellement par l'intermédiaire d'un nombre variable de graphes mixtes vrais.

Ce dernier point est d'ailleurs tout à fait compréhensible, de manière intuitive. Un graphe exotrope vrai ne peut que rejeter des éléments vers l'extérieur, et il ne peut en recevoir ; le rejet ne peut être fait que vers des composantes comportant des fonctions convergentes, c'est-à-dire vers des graphes mixtes ou endotropes. De la même manière, un graphe endotrope vrai ne peut que recevoir des éléments, et cela ne peut provenir que de graphes exotropes ou mixtes. Enfin, un graphe fermé vrai ne peut ni recevoir ni rejeter d'éléments, et il ne peut donc être inclus dans une chaîne de filiation.

La figure 18 donne un exemple de décomposition. Le détail des sommets et des arcs à l'intérieur de chaque graphe vrai n'a pas été représenté. On sait qu'il peut être quelconque, à condition toutefois de constituer une composante fortement connexe.

On remarquera que la décomposition opérée, faite à partir des relations de transfert, met en évidence des relations topologiques et d'ordre, non pas entre les classes-repères mais entre les graphes vrais.



Exemple de décomposition d'un système en graphes vrais

Fig. 18

La partition en classes-repères, choisie à l'origine pour la description du système, définissait déjà une topologie de l'espace de configuration. La partition qui résulte de la décomposition en graphes vrais définit une topologie à un autre niveau, correspondant à des sous-ensembles de classes-repères. Ces deux topologies sont liées à l'existence ou à la non-existence des relations d'ordre. A l'intérieur de chaque graphe vrai, il n'existe pas de relation d'ordre entre les classes-repères, mais au contraire une relation d'équivalence, relativement aux chemins qui unissent ces classes. Mais la décomposition en graphes vrais fait apparaître des relations d'ordre entre ces graphes, l'ordre correspondant à la filiation des états que sont susceptibles de prendre les éléments du système au cours du processus d'évolution. Il faut noter toutefois que la relation d'ordre n'est définissable que pour les graphes vrais appartenant à une même chaîne de filiation. A l'échelle du système il ne s'agit donc que d'un ordre partiel puisqu'il n'est pas possible de définir une relation d'ordre entre des graphes vrais appartenant à des chaînes de filiation différentes.

La décomposition en graphes vrais permet de voir immédiatement à quoi correspond le processus d'évolution. Les éléments des graphes fermés restent dans ces graphes ; il peut y avoir modification du nombre d'éléments contenus dans chacune des classes-repères, mais la structure totale et la structure relationnelle du graphe fermé restent stables. Par ailleurs, il se produit un transfert d'éléments des graphes exotropes vers les graphes endotropes, éventuellement par l'intermédiaire de graphes mixtes. Au fur et à mesure que s'épuisent les transferts d'éléments à partir des différents graphes vrais, la structure du système réel se modifie, les graphes exotropes disparaissant les premiers, puis les graphes mixtes dans l'ordre de filiation. Lorsque tous les transferts possibles sont terminés, les graphes endotropes deviennent des graphes fermés, et leur structure intérieure reste alors stable. Ainsi, un système décomposable en graphes vrais qui ne soient pas uniquement des graphes fermés, subit une évolution à structure variable. Au contraire, les systèmes fortement connexes, c'est-à-dire non décomposables en graphes vrais, et les systèmes dont la décomposition ne fait apparaître que des graphes fermés, ne peuvent subir qu'une évolution à structure constante.

Les résultats qui viennent d'être résumés sont déductibles de la seule connaissance de la structure relationnelle du système. Ils ne font pas intervenir la définition des différentes classes-repères, mais seulement l'existence de celles-ci. De même il n'est pas nécessaire, pour les obtenir, de connaître la nature exacte et la grandeur des relations entre classes-repères ; il suffit de savoir que ces relations correspondent bien à des opérations de transferts d'éléments. Ces résultats sont donc tout à fait généraux, et peuvent être appliqués à des systèmes dont les éléments sont de nature quelconque. Leur utilité ne réside pas seulement dans l'image très évocatrice qu'ils donnent du processus d'évolution, mais aussi dans le fait qu'ils nous permettent de voir clairement quel est l'intérêt et quelles sont les

limites de la notion de structure relationnelle appliquée à un système matériel ou à un système abstrait imposé.

La structure relationnelle d'un système isolé, bien qu'elle ne comporte pas toutes les données nécessaires à la connaissance du système, constitue en quelque sorte un sous-ensemble de données fermé sur lui-même, qui se suffit à lui-même pourrait-on dire. En effet, d'après ce que nous venons de voir, la connaissance de la seule structure relationnelle permet de prévoir si cette structure restera stable ou se modifiera au cours du processus d'évolution. Mais on constate aussi que cette notion de structure relationnelle ne peut être reliée qu'aux propriétés intrinsèques du système, et qu'elle n'exprime même que certains aspects de ces propriétés. En particulier, elle ne nous permet pas de prévoir combien de temps durera l'évolution. Il faudrait pour cela faire intervenir les caractéristiques des classes-repères, le nombre d'éléments qu'elles contiennent, et la grandeur des relations de transfert, c'est-à-dire en définitive l'ensemble des données qui définissent complètement le système.

La question se pose maintenant de savoir si la connaissance, à un instant donné, de la structure relationnelle d'un système isolé permet seulement de prévoir que cette structure sera stable ou se modifiera, ou si elle permet aussi, dans la seconde hypothèse, de préciser vers quelle structure relationnelle stable tend le système dans son processus d'évolution. Il s'agit là d'un problème pratique dont l'analyse va nous permettre de montrer que les données nécessaires à une telle prévision ne sont qu'exceptionnellement contenues dans la seule notion de structure relationnelle.

D'où vient la connaissance que nous pouvons avoir de la structure relationnelle d'un système à un instant donné ? Dans le cas des systèmes abstraits construits, nous avons affaire à un contenu délibérément fixé et non susceptible de changements spontanés. Il s'agit de systèmes définis une fois pour toutes et dans lesquels, comme nous l'avons vu, le temps n'intervient pas. Il ne peut donc être question d'évolution à leur sujet, et nous pouvons par conséquent éliminer ce cas pour le problème qui nous préoccupe ici. En ce qui concerne les systèmes matériels et les systèmes abstraits imposés, notre connaissance de la structure relationnelle passe obligatoirement par la participation en classes-repères que nous choisissons pour décrire le système et par l'affirmation d'existence d'un certain nombre de relations entre ces classes. Mais ce processus est étroitement lié à l'observation des éléments dans les différents états qu'ils peuvent prendre, et aux prévisions que nous pouvons faire sur un certain nombre d'états possibles, non observés au moment où nous étudions le système. La prévision des états possibles, mais non observés, exige à son tour la connaissance de la nature des éléments et des lois auxquelles ils obéissent dans les conditions où ils sont placés. Toutes ces données correspondent pratiquement à la connaissance complète du système ; la plupart d'entre elles, en tout cas, ne sont pas contenues dans la seule notion de structure relationnelle. Si la structure relationnelle d'un

système réel à un instant donné peut, dans une certaine mesure, être considérée comme une donnée première résultant immédiatement de l'observation des éléments et des relations qui existent entre eux, il n'en est évidemment pas de même pour la structure relationnelle théorique qui comporte aussi les états-repères non encore occupés par les éléments du système. Cette seconde structure relationnelle ne peut être atteinte qu'à partir de la connaissance complète du système à l'instant où on l'observe et qui, seule, permet les prévisions nécessaires. Encore faut-il ajouter qu'il s'agit là d'une condition nécessaire mais par forcément suffisante, puisque les prévisions que l'on fait peuvent éventuellement être incomplètes, par exemple si nous ne connaissons pas toutes les lois auxquelles sont soumis les éléments du système.

Considérons, à titre d'illustration, le schéma de la figure 19. Supposons que nous observons, à un instant donné, que les éléments d'un système peuvent occuper cinq états différents, E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5 et qu'existent entre ces états les relations de transfert représentées en traits pleins. La structure relationnelle ainsi définie à partir de l'observation des éléments peut être décomposée en graphe vrais, G_1 étant exotrope et G_2 endotrope. Si nous en restons là, la seule prévision possible en ce qui concerne l'évolution consistera à dire que la structure relationnelle du système tend vers un état stable correspondant à la structure interne du graphe G_2 . C'est ce que l'on peut appeler une *prévision par réduction*, la structure finale étant contenue en tant que partie dans la structure initiale.

Mais il se peut que les éléments du système soient susceptibles d'occuper ultérieurement d'autres états-repères, tels que E_6 , E_7 , E_8 , et que nous n'ayons pas observé ces états, par exemple parce que l'évolution du système était insuffisamment avancée lors de l'observation. Nous nous trouvons alors devant la nécessité de faire une *prévision par extension*, c'est-à-dire en fait de définir la structure totale du système théorique qui constituera le cadre exhaustif servant à décrire à chaque instant le système réel. Ceci ne peut évidemment pas être fait à partir de la seule connaissance de la structure relationnelle du système

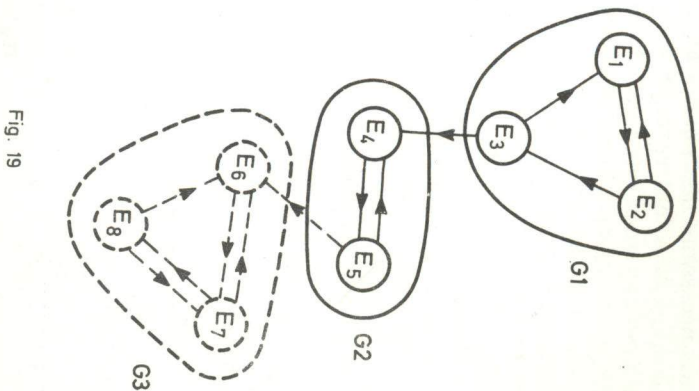


Fig. 19

rél au moment de l'observation. Il est nécessaire de faire intervenir en outre les caractéristiques intrinsèques des classes-repères et les caractéristiques extrinsèques du système, puisque ces données sont indispensables pour prévoir quelles sont, de proche en proche, toutes les transformations possibles. C'est donc en définitive à partir de la structure totale du système réel au moment de l'observation que l'on peut réaliser la prévision par extension du système théorique. A l'intérieur du cadre théorique ainsi fixé, la prévision de l'évolution du système réel est toujours une prévision par réduction. Ainsi, dans le cas de la figure 19, la structure stable vers laquelle tend le système n'est pas celle du graphe G_2 mais celle du graphe G_3 , et cela ne peut être prévu si l'on prend seulement en considération la structure relationnelle du système réel au moment de l'observation.

La prévision par réduction que permet de faire la connaissance de la structure relationnelle, en ce qui concerne sa propre évolution, n'est pas toujours possible de manière complète. Dans certains cas il est nécessaire d'ajouter aux données contenues dans la structure relationnelle, d'autres données qui correspondent à la connaissance du système, ainsi que nous allons le voir maintenant.

Si l'on admet qu'une relation quelconque ne peut disparaître que si la classe dont elle est issue se vide, on constate que tous les graphes exotropes et tous les graphes mixtes disparaissent de la structure du système au cours de l'évolution. Lorsque cette évolution est terminée, seuls subsistent les graphes fermés, et les graphes endotropes qui sont devenus eux-mêmes des graphes fermés. La structure d'équilibre, ou d'adaptation, vers laquelle tend le système peut dans ce cas être prévue exactement à partir de la connaissance de la seule structure relationnelle, à condition bien entendu que cette structure relationnelle ne soit pas susceptible d'extension.

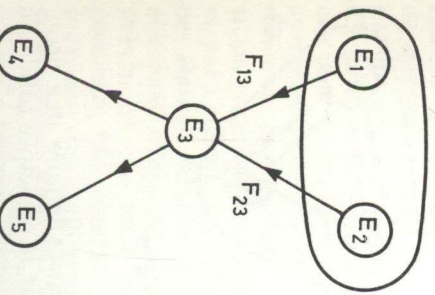


Fig. 20

L'hypothèse que nous venons d'admettre en ce qui concerne les conditions de disparition d'une relation quelconque, correspond à ce que nous avons appelé au chapitre I les *systèmes élémentaires*. Dans le cas des *systèmes composés*, nous avons vu que certaines relations dépendent non seulement de la classe dont elles sont issues, mais aussi d'autres classes du système. Cette situation se traduit par l'existence de sous-systèmes d'interaction regroupant plusieurs classes dont les éléments ne peuvent être transformés indépendamment les uns des autres. Considérons, par exemple le schéma de la figure 20 où les classes E_1 et E_2 constituent un sous-système d'interaction. Les relations F_{13} et F_{23} dépendent alors toutes les deux d'une même fonction $f(N_1, N_2)$ faisant

intervenir les caractéristiques des classes E_1 et E_2 ainsi que, d'une manière générale, les nombres d'éléments N_1 et N_2 contenus respectivement dans chacune de ces deux classes à chaque instant :

$$F_{13} = \alpha_1 \cdot f(N_1, N_2) \\ F_{23} = \alpha_2 \cdot f(N_1, N_2)$$

Les coefficients α_1 et α_2 représentent ici le nombre d'éléments transformés, dans un même laps de temps, respectivement de la classe E_1 à la classe E_3 , et de la classe E_2 à la classe E_3 .

L'existence d'un tel sous-système d'interaction entraîne le fait que la fonction $f(N_1, N_2)$ devient nulle si l'une ou l'autre des classes E_1 et E_2 se vide, puisque les éléments d'une des classes ne peuvent pas être transformés sans la présence d'éléments de l'autre classe :

$$f(N_1, N_2) = 0 \quad \text{si } N_1 \text{ ou } N_2 = 0$$

Ainsi, par exemple, si la classe E_2 se vide il y aura disparition simultanée des fonctions F_{23} et F_{13} , et cela même si la classe E_1 n'est pas vide.

En définitive, la présence de sous-systèmes d'interaction se traduira par le fait que certaines classes, avant d'être vides, seront déconnectées du processus d'évolution qui tendait à les faire disparaître. Si ces classes appartiennent à des graphes exotropes ou à des graphes mixtes, ceux-ci ne disparaîtront pas entièrement comme c'était le cas avec l'hypothèse précédente, mais ils deviendront des graphes fermés non vides. Ces graphes fermés « résiduels », issus de graphes exotropes ou mixtes, peuvent évidemment comporter une seule classe isolée, ou plusieurs classes reliées entre elles par une connectivité forte. En effet, une classe appartenant à un sous-système d'interaction qui tend à la faire disparaître, peut également être incluse dans un ensemble de relations cycliques qui subsisteront au cours du processus d'évolution. C'est le cas, par exemple, du système représenté par la figure 21, si l'on admet que N_2 s'annule avant N_1 . Alors que dans le cas de la figure 20, la classe E_1 restait alors isolée, dans le cas de la figure 21 les classes E_1 , E_6 , E_7 subsistent sous la forme d'un graphe fermé unique.

La prévision d'existence, dans la structure finale du système, des graphes fermés résiduels provenant des graphes exotropes et mixtes, ne

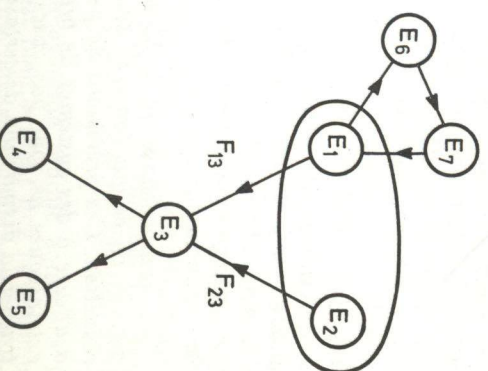


Fig. 21

peut donc pas être faite à partir de la seule connaissance de la structure relationnelle. Il est nécessaire pour cela de prendre en considération la forme analytique des fonctions d'interaction et le nombre d'éléments contenus dans les différentes classes à chaque instant, c'est-à-dire pratiquement l'ensemble des données qui définissent le système puisque les caractéristiques intrinsèques des classes et les caractéristiques extrinsèques du système interviennent dans les fonctions d'interaction.

Une autre circonstance, que l'on peut cette fois rencontrer aussi bien dans les systèmes élémentaires que dans les systèmes composés, va nous conduire à une conclusion analogue. Souvenons-nous en effet que les caractéristiques extrinsèques qui interviennent dans les fonctions d'interaction peuvent correspondre, soit à des actions extérieures sous la forme de champs de natures diverses, soit à des caractéristiques dépendant de l'ensemble des éléments du système. Dans ce second cas on conçoit que l'évolution d'un système, même isolé, puisse entraîner une variation de certaines caractéristiques extrinsèques si celles-ci dépendent de la répartition des éléments dans les différentes classes. Il est alors possible que certaines fonctions d'interaction disparaissent, selon la forme de leur dépendance vis-à-vis des caractéristiques extrinsèques qui varient. Cette situation peut se rencontrer, par exemple, dans un système matériel au sein duquel se produisent des transformations dépendant de la température et présentant un seuil vis-à-vis de cette caractéristique extrinsèque. Si, au cours de l'évolution, la température s'abaisse au-dessous de ce seuil, les transformations considérées cesseront et les relations de transfert qui les représentaient disparaîtront. Ce type de phénomène peut, comme dans l'hypothèse précédente, s'opposer à ce que certains graphes exotroques ou mixtes se vident complètement au cours du processus d'évolution. Et l'on voit qu'ici encore la prévision d'existence des graphes fermés résiduels provenant de ce phénomène nécessite la connaissance complète du système, et pas seulement de sa structure relationnelle.

Ce qui précède permet d'aboutir à une conclusion importante qui met bien en évidence une des différences essentielles entre le concept de système et celui de structure, et qui montre une fois de plus la nécessité de distinguer nettement ces deux notions, contrairement à ce qui se fait souvent :

La connaissance de la structure relationnelle d'un système isolé ne permet, en ce qui concerne sa propre évolution, que des prévisions par réduction. Ces prévisions ne peuvent d'ailleurs être complètes que si l'on a affaire à des systèmes de type élémentaire, et dont les caractéristiques extrinsèques ne sont pas susceptibles, par leurs seules variations, d'entraîner la disparition de certaines relations entre classes-repères. Lorsque l'une au moins de ces conditions n'est pas remplie, l'évolution de la structure relationnelle ne peut être prédite qu'à partir de la connaissance complète du système.

Enfin, dans tous les cas, qu'il s'agisse de systèmes élémentaires ou de systèmes composés, la prévision par extension du système théorique exhaustif adapté à la description du système réel ne peut être faite qu'à partir de la connaissance de la structure totale du système réel à un instant donné. La prévision de l'évolution du système réel est toujours une prévision par réduction, à l'intérieur du cadre théorique ainsi fixé, et elle obéit par conséquent aux règles précédentes.

On voit que toutes ces conditions sont en réalité très restrictives, et que la structure relationnelle ne comporte pas, dans la plupart des cas, toutes les données nécessaires à la prévision de sa propre évolution. Cette insuffisance déjà très sensible, comme nous venons de le voir, lorsqu'il s'agit des propriétés liées à l'évolution d'un système isolé, va apparaître plus nettement encore à propos de l'évolution des systèmes non isolés.

ÉVOLUTION D'UN SYSTÈME NON ISOLÉ.

Par définition, un système non isolé subit une action venant de l'environnement dans lequel il est placé. Au niveau du système, cette action extérieure peut correspondre à deux modes différents, selon qu'elle est traduisible en termes de champs ou qu'elle comporte un apport d'éléments. On peut utiliser à ce propos la terminologie classique des thermodynamiciens, même si celle-ci n'est habituellement utilisée que pour les systèmes matériels. L'extrapolation de ce langage aux systèmes abstraits est apparemment tout à fait possible, surtout si nous nous abstenons d'introduire la notion d'énergie, dont l'usage pour les systèmes non matériels est sujet à caution. Nous dirons donc qu'un système qui ne subit que l'action de champs extérieurs est un système non isolé mais *fermé*. S'il y a apport ou retrait d'éléments, le système non isolé sera dit *ouvert*.

Nous ne nous occuperons pas ici de savoir comment est constitué dans le détail l'environnement du système, qu'il s'agisse des sources de champs, ou des sources et réceptacles d'éléments. Il nous suffit de connaître comment ces relations avec l'extérieur se traduisent au niveau du système. Ce n'est que dans le prochain paragraphe que nous prendrons en compte la constitution exacte de cet environnement, sous la forme de systèmes divers susceptibles eux aussi d'évolution comme le système unique que nous considérons maintenant. Nous verrons ainsi comment se présentent les problèmes d'évolution pour un système de systèmes.

Considérons maintenant le cas d'un système unique soumis à la seule action d'un champ extérieur. Il est bien évident que la présence de ce champ ne correspondra à une action effective sur le système que si les éléments constitutifs de celui-ci sont susceptibles de subir des transformations dues à ce champ. Ces transformations ne sont pas

forément nouvelles par rapport à celles qui existaient dans le système avant l'application du champ, mais bien entendu elles peuvent l'être.

Dans le premier cas, la structure totale et la structure relationnelle du système ne sont pas modifiées. L'action du champ se traduit seulement par une modification de grandeur des relations entre classes-repères, ou tout au moins de certaines d'entre elles. Si le système est dans un état d'équilibre avant l'application du champ, sa structure d'équilibre restera la même en présence du champ. La seule variation possible sera celle du nombre d'éléments contenus dans chacune des classes-repères. Si le champ extérieur est constant, le système tendra vers un nouvel état d'équilibre à structure constante. Lorsque le système n'est pas dans un état d'équilibre lors de l'application du champ, il n'est plus possible de conclure d'une manière aussi générale. Et cela même si, comme nous le supposons ici, le champ extérieur n'entraîne pas l'apparition d'états nouveaux pour les éléments constitutifs du système. En effet, si la même décomposition du système en graphes vrais est valable pour les instants qui précèdent et pour les instants qui suivent l'application du champ, il n'en reste pas moins que ce champ, qui intervient sous la forme de caractéristiques extrinsèques du système, peut modifier l'importance relative de certaines transformations et jouer par là sur certains aspects qualitatifs de l'évolution du système. C'est ainsi que des phénomènes à seuil tels que ceux que nous avons déjà mentionnés, susceptibles de provoquer la disparition de certaines relations sans que les classes dont celles-ci sont issues soient vides, peuvent alors intervenir différemment ou même disparaître. La présence du champ peut alors entraîner des modifications touchant aux graphes fermés résiduels provenant des graphes exotropes ou mixtes. La structure du système à la fin de l'évolution peut, de ce fait, être différente de ce qu'elle aurait été en l'absence de champ. Dans un système matériel, par exemple, un apport continu de chaleur peut éviter au cours d'une évolution la disparition de certaines transformations présentant un seuil de température, et entraîner ainsi la suppression de certains graphes fermés résiduels qui subsisteraient si le système était isolé. Une situation analogue peut se retrouver avec des systèmes composés si l'action du champ extérieur est sélective, c'est-à-dire si elle modifie différemment les diverses relations de transfert du système. Considérons par exemple le schéma de la figure 22, avec le sous-système d'interaction (E_1 , E_2), et supposons qu'en l'absence de champ extérieur la classe E_1 se vide avant la classe E_2 . Les fonctions F_{13} et F_{23} disparaissent alors simultanément. Les

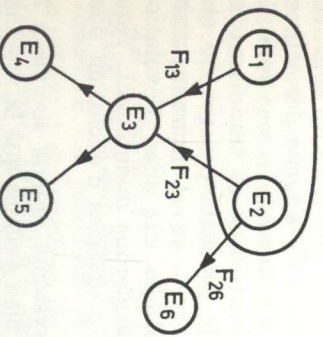


Fig. 22

éléments restants de E_2 continuent à évoluer vers E_6 , et ceux de E_3 vers E_4 et E_5 . A la fin de l'évolution, seules subsistent les classes E_4 , E_5 et E_6 . Si le champ extérieur agit préférentiellement sur la fonction F_{26} , en accélérant ce processus de transformation, il se peut que la classe E_2 se vide avant la classe E_1 . A la fin de l'évolution, des éléments de E_1 subsisteront avec ceux des classes E_4 , E_5 , E_6 , alors qu'ils étaient absents de l'état d'équilibre sans champ extérieur.

Nous nous trouvons ici dans une situation tout à fait analogue à celle que nous avons rencontrée à propos de l'évolution d'un système isolé. La connaissance de la structure relationnelle n'est qu'exceptionnellement suffisante pour prévoir de manière complète vers quelle structure d'équilibre évolue le système. Pour traiter ce problème il faut en général, comme nous l'avons vu, faire intervenir l'ensemble des données qui définissent le système. Dans le cas présent il est d'abord nécessaire, bien entendu, de traduire l'action du champ extérieur en termes de caractéristiques extrinsèques du système, puis de voir comment ces caractéristiques interviennent dans la valeur des relations de transfert. Ce n'est qu'ensuite que les données relatives au système, ainsi complétées, sont prises en compte pour étudier complètement l'évolution du système ou même seulement l'évolution de sa structure.

Nous avons admis dans ce qui précède que la structure du système, totale ou relationnelle, n'était pas modifiée lors de l'application du champ extérieur, et que seule l'évolution de cette structure pouvait éventuellement subir quelques changements dus à la présence du champ. En réalité il s'agit là d'une situation tout à fait particulière, qui ne peut être reconnue qu'après une étude préliminaire. En effet, dans la plupart des cas l'application d'un champ extérieur entraîne l'apparition de transformations qui ne se produisaient pas auparavant. L'étude de l'action du champ nécessite donc, dans une première étape, la définition des nouvelles classes-repères indispensables à une description convenable du système, ainsi que des relations nouvelles entre classes, que ces classes soient elles-mêmes nouvelles ou non. Nous retrouvons ici le problème de la prévision par extension du système théorique nécessaire à la description du système réel au cours de son évolution. Nous savons que cette prévision nécessite la connaissance de la structure totale du système réel, à laquelle il faut ajouter maintenant la connaissance de la nature du champ extérieur, c'est-à-dire des caractéristiques extrinsèques qui traduisent la présence de ce champ au sein du système. Il va sans dire que cette prévision exige aussi la connaissance, au moins qualitative, des phénomènes par lesquels le champ peut entraîner la transformation des éléments, ainsi que des phénomènes correspondant aux interactions possibles entre les divers éléments présents à chaque instant dans le système. Mais ceci n'entraîne pas la nécessité de connaître la forme précise des assemblages de caractéristiques correspondant aux relations entre classes-repères, c'est-à-dire la donnée 8 de la définition complète d'un système (cf. chap. II). C'est donc bien la structure totale du système

qui nous intéresse ici. Ce point un peu délicat, lié à la genèse pratique de notre connaissance d'un système et de sa structure, sera examiné d'une manière détaillée au chapitre V.

Considérons maintenant le cas d'un système non isolé et ouvert, c'est-à-dire recevant des éléments de l'extérieur et en rejetant, ou soumis seulement à l'un de ces deux phénomènes. La première question qui se pose est de savoir quelle est la nature des éléments que reçoit le système, et comment se situent ces éléments, en ce qui concerne l'ensemble de leurs caractéristiques, par rapport à ceux que contient déjà le système au moment où commence l'apport extérieur. Si les éléments importés ont des caractéristiques correspondant à des classes-repères déjà utilisées pour la description du système initialement isolé, l'apport se traduit par une injection directe d'éléments dans ces classes préexistantes. Il n'y a pas de modification de la structure interne du système, bien qu'il puisse y avoir comme nous le verrons un peu plus loin des changements divers dans la répartition des graphes vrais. Dans la même hypothèse, les éléments rejetés ne peuvent provenir que de classes également préexistantes. Si, au contraire, les éléments importés sont différents de tous ceux que comporte initialement le système, il est nécessaire de prévoir les interactions possibles entre les premiers et les seconds, de manière à définir la structure théorique adaptée à la description du nouveau système ainsi constitué. Le rejet d'éléments vers l'extérieur peut cette fois se faire à partir de classes-repères préexistantes ou à partir de classes nouvelles. Nous retrouvons, ici encore, le problème de la prévision par extension, avec la connaissance qu'elle exige de la nature des éléments en cause. Afin de déterminer si le système théorique initial est suffisant ou doit être modifié pour rendre compte des conséquences des apports et retraits d'éléments, il est nécessaire de considérer dans chaque cas, et en premier lieu, la structure totale du système réel avant que ces phénomènes interviennent.

Il est intéressant de noter que dans les systèmes ouverts, l'apport et le retrait d'éléments jouent des rôles présentant une certaine dissymétrie. Les modifications ou le maintien de la structure initiale ne dépendent en effet que de la nature des éléments importés et des éléments préexistants. Les éléments rejetés ne jouent évidemment pas de rôle analogue ; que leur retrait soit spontané ou qu'il résulte d'une action extérieure délibérée, il ne peut se faire qu'à partir d'une des classes résultant des propriétés intrinsèques du système et de la nature des éléments importés. Bien entendu, cette conclusion n'est valable que dans le cadre des conditions admises ici. En pratique, il arrive souvent que le rejet d'éléments d'un système ouvert soit influencé par certaines conditions imposées par l'environnement. Mais il s'agit là d'une situation nouvelle dans laquelle l'environnement doit être, soit inclus dans le système étudié, soit considéré lui-même comme un système en interaction avec celui que l'on étudie. Ce cas relève donc du problème de l'évolution d'un système de systèmes, que nous examinerons un peu plus loin.

Si l'apport et le retrait d'éléments peuvent modifier ou laisser inchangées les classes-repères et les relations entre ces classes, par rapport à ce qu'elles étaient dans le système initialement isolé, la nature et l'évolution de certains graphes vrais sont, elles, toujours modifiées. Cela se conçoit immédiatement, tout au moins à titre de possibilité, lorsqu'il y a une modification des classes-repères et des relations entre classes. Mais ces transformations interviennent toujours, même lorsque la structure totale théorique nécessaire à la description du système reste inchangée, comme il est facile de le voir. Considérons par exemple un système initialement isolé et, pour plus de généralité, supposons-le en cours d'évolution, c'est-à-dire décomposable en plusieurs types de graphes vrais. Soit, à titre d'illustration, le schéma de la figure 23 représentant le système avant qu'interviennent les apports et retraits d'éléments. Nous admettrons que la structure théorique reste la même, c'est-à-dire que les transferts d'éléments de l'extérieur ou vers l'extérieur ne mettent en cause que des classes préexistantes. Différents apports et retraits possibles sont schématisés par des flèches pointillées A et R . Les divers graphes vrais sont repérés par leur sigle habituel, selon leur nature, et par un numéro-repère arbitraire.

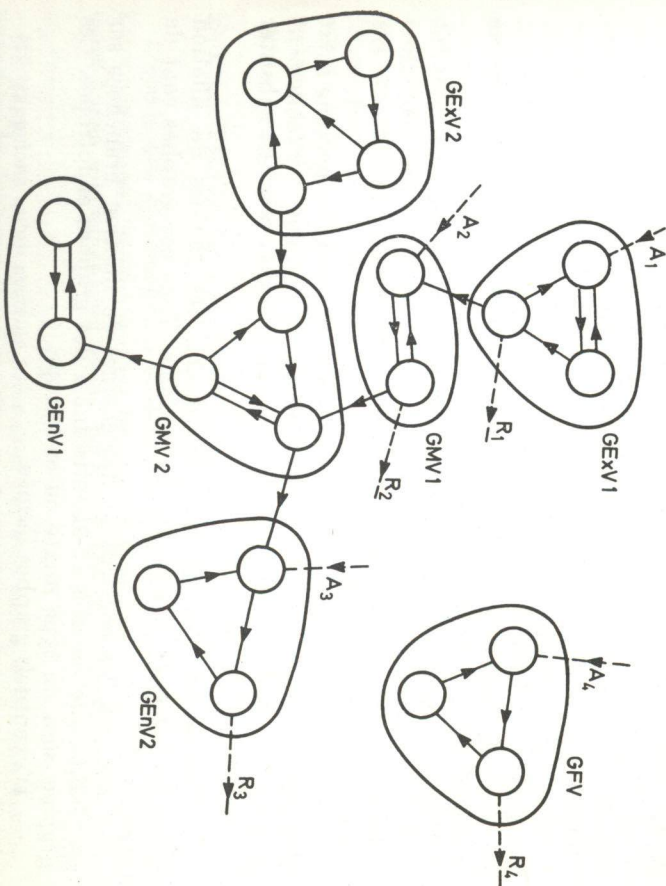


Fig. 23

Un certain nombre de résultats évidents sont immédiatement visibles sur ce schéma :

Un apport d'éléments dans une classe ne modifie la nature du graphe vrai auquel appartient cette classe que si ce graphe est initialement exotrope ou fermé ; celui-ci devient alors mixte, dans le premier cas, ou endotrope dans le second.

Un retrait d'éléments à partir d'une classe ne modifie la nature du graphe vrai auquel appartient cette classe que si ce graphe est initialement endotrope ou fermé ; celui-ci devient alors mixte dans le premier cas, ou exotrope dans le second.

Seuls les graphes initialement mixtes conservent leur nature, qu'ils subissent des apports ou des retraits d'éléments.

Par ailleurs, il est clair qu'un système ne subissant que des apports d'éléments verrait son contenu croître continûment, si l'apport extérieur est lui-même continu. Du point de vue de la structure du système réel, seuls subsisteraient au bout d'un certain temps les graphes vrais situés sur les différentes chaînes de filiation possibles entre l'entrée du système (là où se fait l'apport d'éléments), et les différents graphes endotropes. A l'exception de ces graphes endotropes, dans lesquels s'accumuleraient les éléments, et des graphes fermés, tous les autres graphes vrais seraient mixtes. Par exemple, dans le cas de la figure 23, si l'on considère un apport unique tel que A_1 , la seule partie de la structure du système réel appelée à disparaître au bout d'un certain temps est celle qui correspond au $GE_{xV}2$. Avec un apport unique tel que A_4 , seuls subsisteraient au bout d'un certain temps les graphes endotropes $GE_{nV}1$ et $GE_{nV}2$, devenant à l'équilibre des graphes fermés, et le graphe fermé GFV , devenu lui-même un graphe endotrope. Bien entendu, des graphes fermés résiduels peuvent également subsister, comme nous l'avons déjà vu d'une manière tout à fait générale.

D'autres constatations peuvent être faites si le système ne subit que des retraits d'éléments. A la fin de l'évolution, il ne peut alors subsister éventuellement que des graphes fermés, si le système n'a pas été totalement vidé.

Le cas le plus intéressant est évidemment celui où le système subit à la fois des apports et des retraits d'éléments. On peut voir facilement que dans un tel système, seuls les graphes suivants peuvent subsister au bout d'un certain temps :

— L'ensemble des graphes constituant des chaînes de filiation entre les entrées et les sorties du système. Tous ces graphes sont de type mixte.

— Les graphes constituant des chaînes de filiation branchées sur les chaînes précédentes et aboutissant à des graphes endotropes. Ces graphes sont de type mixte ou endotrope.

— D'éventuels graphes fermés.

Par exemple, si l'on reprend le schéma de la figure 23, et que l'on considère l'apport A_1 et le retrait R_2 , la structure du système tendra au

bout d'un certain temps d'évolution vers l'ensemble de graphes suivant :

- $GE_{xV}1$ — $GMV1$, devenue une chaîne de deux graphes mixtes.
- Les chaînes $GMV2$ — $GE_{nV}1$ et $GMV2$ — $GE_{nV}2$, branchées sur la chaîne précédente par le graphe $GMV2$.
- Le graphe fermé GFV .

Si l'on considère l'apport A_3 et le retrait R_2 , la structure du système tendra vers :

- $GE_{nV}2$, devenu graphe mixte.
- $GE_{nV}1$, devenu graphe fermé ; et le graphe fermé GFV .

La structure d'un système ouvert peut donc, comme celle d'un système fermé (1), tendre vers un équilibre. Toutefois, une première différence essentielle entre ces deux catégories de systèmes résulte du fait que l'équilibre structural d'un système ouvert peut comporter à la fois des graphes mixtes, endotropes, et fermés, alors qu'il ne peut correspondre qu'à des graphes fermés si le système est lui-même fermé. Il faut ensuite noter que l'état d'équilibre structural n'implique pas que le système est lui-même à l'équilibre, c'est-à-dire que le nombre d'éléments contenus dans chacune de ses classes est constant. Nous avons déjà rencontré divers exemples d'évolution d'un système à structure constante. Pour un système ouvert, on conçoit immédiatement que ce type d'évolution subsistera si sa structure d'équilibre comporte des graphes endotropes, puisqu'il y a alors accumulation d'éléments dans ces graphes.

La structure d'un système ouvert à l'équilibre ne peut comporter que des chaînes de graphes mixtes, et des graphes fermés.

On notera que les graphes fermés peuvent être isolés ou entretenir des échanges par champs avec les chaînes de graphes mixtes. Dans le premier cas, on a affaire en réalité à des systèmes indépendants, qui peuvent être étudiés séparément. Dans le second cas, les graphes fermés font partie intégrante du système considéré, bien qu'il ne puisse pas y avoir échange d'éléments entre eux et le reste du système. Nous allons retrouver cette situation dans l'étude des systèmes de systèmes.

ÉVOLUTION D'UN SYSTÈME DE SYSTÈMES.

L'étude des systèmes non isolés nous a montré que le rôle joué par l'environnement, vis-à-vis d'un système quelconque, peut relever de deux types fondamentaux, selon qu'il correspond à l'intervention de

(1) Rappelons qu'un système fermé peut être isolé ou non isolé. Mais dans le second cas les échanges avec l'extérieur ne peuvent exister que sous la forme de champs. Un système fermé est donc défini par la seule condition que ses échanges avec l'extérieur ne se font pas sous la forme d'éléments.

champs ou qu'il donne lieu à des échanges d'éléments. Cette distinction correspond comme nous l'avons vu, aux notions de système fermé et de système ouvert, applicables aux systèmes non isolés. Un système fermé entretient avec l'environnement des échanges sous la seule forme de champs d'interaction. Les échanges d'un système ouvert mettent obligatoirement en jeu des éléments, mais cela n'exclut pas pour ce type de système l'existence d'échanges par champs.

Dans les pages qui précèdent nous avons implicitement admis une dissymétrie flagrante entre le système étudié et son environnement. Le système subissait des transformations par suite des échanges avec l'extérieur, mais n'était pas considéré comme pouvant avoir lui-même une action modificatrice sur l'environnement. Or, tout au moins, si cette action en retour n'était pas exclue, elle était censée n'avoir aucune incidence sur ce que recevait le système. Dans ce cas, la connaissance à chaque instant des actions provenant de l'extérieur constitue un ensemble de données premières. Si l'on admet en outre que l'action du système vers l'extérieur ne dépend à chaque instant que de son état propre, selon des lois quelconques, les problèmes liés à l'évolution du système peuvent être envisagés, d'une manière tout à fait générale, comme nous l'avons fait.

Dans de nombreux cas, cette situation relativement simple ne peut plus être admise, et il est nécessaire de considérer que l'on a affaire à divers systèmes agissant les uns sur les autres. Le problème de l'évolution simultanée de ces systèmes devient évidemment plus compliqué.

Soit par exemple trois systèmes A , B , C , que nous supposons initialement isolés les uns des autres. Avant que débute les interactions, chacun de ces systèmes se trouve dans un certain état, qui peut être d'équilibre ou d'évolution, et dans ce dernier cas il peut s'agir d'une évolution à structure stable ou à structure variable. Quelles que soient ces situations particulières, admettons simplement que l'on connaît, pour chacun des systèmes, la structure totale théorique qui serait suffisante pour le décrire au cours du temps, s'il restait isolé. Nous appellerons ces structures théoriques A_{th} , B_{th} , C_{th} , les lettres majuscules sans indices telles que A , B , C , symbolisant l'ensemble des données qui permettent de définir complètement chacun des systèmes réels à un instant donné. Supposons d'abord que les interactions possibles entre les systèmes ne puissent se faire que par l'intermédiaire de champs, et sans échanges d'éléments. Afin de ne pas confondre ces interactions avec celles qui donnent lieu à échanges d'éléments, nous les noterons par des flèches ondulées, comme il est indiqué dans le schéma de la figure 24.

Ce schéma représente la situation des systèmes à l'instant t_0 , au moment où débute ces interactions. On remarquera qu'il s'agit ici d'un premier cas particulier puisque le système A influence les systèmes B et C mais n'est pas influencé par eux. Chacun des systèmes réels est alors dans un état donné $A(t_0)$, $B(t_0)$, $C(t_0)$. La structure totale théorique adaptée à la description du système A au cours de son évolution reste ce qu'elle était auparavant, A_{th} , puisque ce sys-

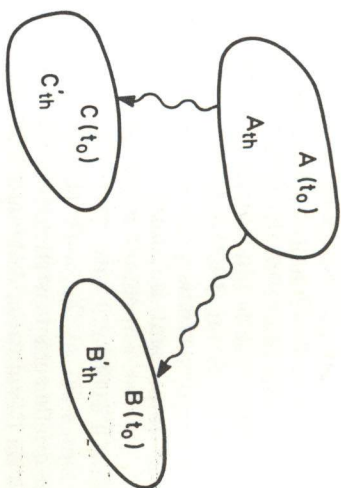


Fig. 24

tème ne subit aucune influence nouvelle. En revanche, les structures totales théoriques nécessaires pour décrire l'évolution des systèmes B et C sont modifiées par l'influence de A , et deviennent B_{th} et C'_{th} . Ces structures nouvelles comportent toutes les classes-repères correspondant aux états que pourront prendre les éléments de B et de C au cours de l'évolution de ces systèmes, ainsi que les relations entre ces classes. La prévision par extension que constitue la recherche de ces données ne peut plus être faite à partir de la structure totale des systèmes réels B et C , comme c'était le cas pour B_{th} et C_{th} lorsque ces systèmes étaient isolés, mais elle exige en outre la prise en considération du système A , ou plutôt de sa structure théorique A_{th} . Nous savons en effet que la nature de l'influence que peut exercer le système A sur les systèmes B et C , dépend de la nature des éléments qu'il contient et des transformations que peuvent subir ceux-ci (cf. Chap. III § Fonction d'un système dans un système de systèmes). Ces données sont contenues dans la structure totale, et si l'on considère celle-ci pour le système théorique, et non pas seulement pour le système réel à un instant donné, les prévisions que l'on peut faire s'étendent à toute l'évolution possible. On peut donc dire que les structures totales théoriques B_{th} et C'_{th} sont déductibles des structures totales des systèmes réels à un instant donné, $B(t_0)$ et $C(t_0)$, et de la structure totale théorique du système A , soit A_{th} .

Connaissant la structure totale théorique de chaque système, nous en connaissons *a fortiori* la structure relationnelle. Nous avons vu, à propos des systèmes isolés, que la connaissance de ces structures théoriques ne permet qu'exceptionnellement de prévoir vers quelle structure d'équilibre tend le système au terme de l'évolution, et qu'une telle prévision nécessite la connaissance de toutes les données définissant le système. Cette conclusion reste bien entendu valable ici, pour chacun des systèmes A , B , C . Mais pour les systèmes B et C

une condition supplémentaire intervient maintenant. Pour traiter complètement l'évolution de chacun de ces systèmes, il est nécessaire de connaître à chaque instant l'état du système A . En effet, l'influence du système A se traduit par le fait que dans les équations d'évolution des caractéristiques de B ou de C interviennent non seulement les données relatives à ces systèmes, mais aussi les caractéristiques du système A . Il est important de noter que la connaissance de A à chaque instant n'est pas seulement nécessaire pour traiter avec précision la cinétique d'évolution des systèmes B et C , à l'intérieur des structures théoriques B_{in} et C_{in} , mais elle est également indispensable pour déterminer quelle sera la structure d'équilibre de chacun de ces systèmes à la fin de l'évolution. Autrement dit, la structure d'équilibre vers laquelle tend le système B ou le système C peut dépendre de l'ordre de déroulement des phénomènes, non seulement à l'intérieur de B ou de C mais aussi à l'intérieur de A . Ce fait, que l'on conçoit assez facilement, peut être illustré par un exemple simple.

Considérons les schémas de la figure 25, qui représentent une partie du système A et une partie du système B , et supposons que le passage des éléments de E'_3 à E'_4 dans le système B est provoqué par le trans-

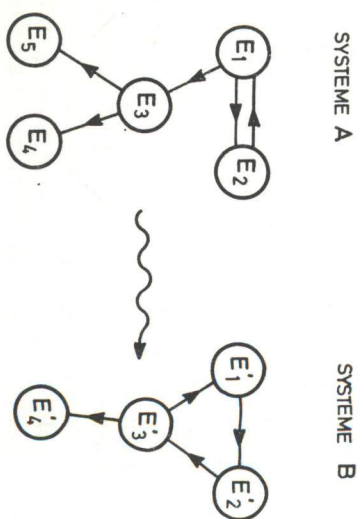


Fig. 25

fert des éléments de E_3 vers E_4 dans le système A . Si la classe E_3 se vide avant que la classe E'_3 le soit, la structure relationnelle comportant les classes E'_1, E'_2, E'_3 subsistera en tant que graphe fermé dans la structure d'équilibre finale du système B , alors qu'elle disparaîtra si la classe E_3 de A ne se vide qu'après la classe E'_3 de B .

Le système de systèmes (A, B, C) que nous venons de considérer représente un cas particulier où les influences qu'exercent les systèmes les uns sur les autres sont hiérarchisées. Le système A constitue ce que l'on pourrait appeler le *noyau* du système de systèmes, en ce sens

que s'il exerce une influence sur les autres systèmes, il peut être étudié lui-même comme s'il était isolé. Quel que soit le nombre de systèmes en présence, leur étude peut être menée comme nous l'avons vu, de proche en proche en commençant par le noyau et en tenant compte ensuite, pour un système quelconque, des systèmes dont il dépend hiérarchiquement. Un système de systèmes peut avoir un ou plusieurs noyaux. On remarquera que ceux-ci jouent un rôle analogue à celui des graphes exotopes dans les systèmes d'éléments, mais les liens de dépendance ne correspondent plus ici à des transferts d'éléments.

Dans de nombreux cas, les influences qui s'exercent entre les systèmes ne réalisent pas une hiérarchie simple, mais mettent en jeu des interactions réciproques. La figure 26 schématise un système de sys-

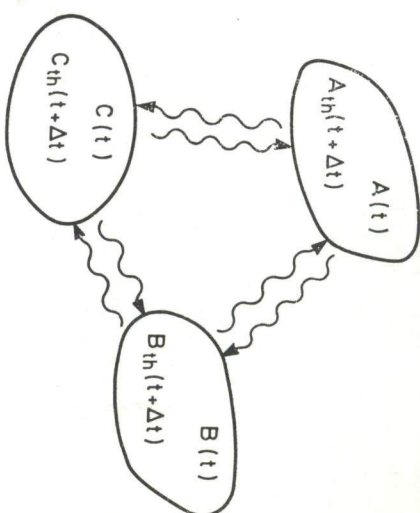


Fig. 26

tèmes dans lequel chaque système influence les autres et subit en retour l'influence de ceux-ci. Le problème de l'évolution de ces divers systèmes ne se présente plus dans les mêmes termes que précédemment. En particulier il n'est plus possible de définir *a priori*, pour aucun des systèmes, une structure théorique adaptée à la description de toute l'évolution future. La seule solution dans ce sens consisterait à définir, pour chacun des systèmes, un ensemble de classes-repères correspondant à toutes les variations imaginables de toutes les caractéristiques des éléments qu'il contient. Mais cela ne serait pas d'un grand secours ; d'autant plus que les conditions de transfert des éléments d'une classe dans une autre ne pourraient pas, elles non plus, être prévues autrement qu'en vertu de l'ensemble des possibilités imaginables. Tenir compte de toutes les possibilités imaginables, en

ce qui concerne les classes-repères et les relations entre classes, revient à admettre *a priori* que toutes les caractéristiques des divers éléments peuvent prendre n'importe quelles valeurs, à la seule condition qu'aucun des jeux de valeurs ainsi possibles pour un élément n'entraîne de contradiction avec la notion même d'élément. Il s'agit là évidemment de conditions très peu restrictives, les seules limitations ne pouvant résulter que de la connaissance que nous avons des relations de dépendance existant entre les diverses caractéristiques d'un même élément. Cette manière de faire est d'ailleurs employée très souvent, en particulier chaque fois que l'on utilise les propriétés d'une structure mathématique pour étudier un assemblage de caractéristiques exprimant une loi à laquelle obéissent des éléments ; cette question importante sera examinée en détail au chapitre V. Au contraire, l'intérêt des structures totales théoriques que nous avons considérées jusqu'ici réside dans le fait que les classes-repères qu'elles contiennent, et les relations entre ces classes, résultent d'un inventaire des transformations effectivement possibles dans le système, et seulement de celles-là, à l'exclusion de toute transformation imaginable mais non susceptible d'être réalisée en fait dans les conditions du système. Pour le moment, nous restons dans cette optique.

Pour aucun des systèmes de la figure 26 il n'est donc plus possible de définir *a priori* une structure totale théorique, représentant tous les états et toutes les transformations des éléments au cours de l'évolution du système. La prévision par extension ne peut plus se faire que de proche en proche, en tenant compte à chaque instant de la structure totale de tous les systèmes réels qui interagissent. Ainsi, pour prévoir la structure totale théorique d'évolution du système A entre les instants t et $t + \Delta t$, il faut tenir compte des transformations susceptibles d'intervenir dans les éléments de ce système, du fait des propriétés particulières du système et des modifications que celles-ci subissent par suite de l'influence des systèmes $B(t)$ et $C(t)$. On aboutit de cette manière à une structure totale théorique $A_{th}(t + \Delta t)$, qui dépend à la fois de $A(t)$, de $B(t)$, et de $C(t)$. La même opération peut être faite pour les autres systèmes, et répétée ensuite pour des intervalles de temps ultérieurs.

En définitive, la prévision des structures totales théoriques nécessaires à la description de l'évolution du système de systèmes peut en principe être faite à partir de la connaissance de la structure totale de chacun des systèmes réels à un instant donné. Mais, ici encore, l'étude précise de la dynamique d'évolution, et même seulement la prévision des structures totales d'équilibre, exigent la prise en considération des données définissant entièrement les systèmes à chaque instant. Bien entendu, la résolution de ces problèmes peut se heurter en pratique à des difficultés plus ou moins grandes. On sait en particulier que les interactions entre divers objets, éléments ou systèmes, qui possèdent certaines caractéristiques intrinsèques dépendant à chaque instant les uns des autres, donnent lieu à ce que l'on appelle « un problème à n corps » dont la solution, en général impossible par

les méthodes analytiques rigoureuses, doit le plus souvent être abordée par des méthodes d'approximations successives plus ou moins lourdes. Mais cette question est ici hors de notre propos. Dans une étude telle que celle que nous menons, il nous importe seulement de déterminer quelles sont, en droit, les données strictement nécessaires pour prévoir l'évolution des systèmes, ou tout au moins de certaines de leurs caractéristiques comme la structure totale, et la structure relationnelle, à chaque instant ou à l'équilibre ; et cela indépendamment des méthodes que l'on peut être conduit à utiliser en pratique, afin de résoudre ces problèmes pour tels ou tels systèmes particuliers.

Considérons maintenant le cas d'un système de systèmes dans lequel les interactions peuvent donner lieu à des échanges d'éléments entre les systèmes initialement isolés. Rappelons que ces échanges peuvent se produire, soit par apparition de sous-systèmes d'interaction faisant intervenir des éléments qui appartiennent initialement à des systèmes différents, soit par simple confusion de classes-repères identiques. Ces deux possibilités ont déjà été illustrées par les figures 7, 8 et 9. Nous avons vu alors qu'il est nécessaire, pour prévoir ces types d'interactions, de connaître la structure totale des systèmes réels en présence. Lorsque les interactions possibles ont été ainsi précisées, le système de systèmes ne constitue plus en fait qu'un système unique. Si l'on veut prévoir la structure totale théorique adaptée à la description de l'évolution de ce système, il est nécessaire, comme nous l'avons déjà vu, de connaître la structure totale du système réel unique qui se constitue lorsque s'amorcent les interactions avec échanges d'éléments. Nous savons qu'ensuite, l'étude de l'évolution de la structure de ce système réel à l'intérieur du cadre théorique qui vient d'être défini exige la connaissance, soit de la seule structure relationnelle, soit le plus souvent de l'ensemble des données définissant le système.

Il est important de noter que la structure totale de chacun des systèmes réels, au moment où débute les interactions avec échanges d'éléments, n'est pas forcément identique à la structure totale des systèmes initialement isolés. Dans de nombreux cas, les échanges d'éléments peuvent être précédés d'interactions par champs entre les divers systèmes, ce qui peut entraîner une modification des structures totales des systèmes réels. La possibilité de telles interactions doit être étudiée selon la procédure générale que nous avons décrite, préalablement à la détermination des processus d'échanges d'éléments.

L'étude des systèmes isolés nous avait permis de montrer le rôle que joue le concept de structure totale dans les prévisions par extension nécessaires à la description des phénomènes d'évolution. Ce rôle est maintenant confirmé pour les systèmes non isolés, que ceux-ci soient fermés ou ouverts. On peut résumer de la manière suivante les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenus :

Dans l'étude de l'évolution des systèmes, que ceux-ci soient isolés, fermés, ou ouverts, on qu'il s'agisse de systèmes de systèmes, les prévisions

par extension relatives aux structures exigent toujours la connaissance de la structure totale des systèmes réels à un instant donné.

A l'intérieur du cadre théorique fixé par les prévisions par extension, l'étude de l'évolution des structures des systèmes réels à chaque instant constitue une prévision par réduction qui exige la connaissance de toutes les données définissant les systèmes considérés.

La détermination des structures d'équilibre vers lesquelles tendent les systèmes au terme de leur évolution nécessite, dans le cas le plus général, la connaissance complète de l'évolution des systèmes. Pour un système isolé, et dans certains cas particuliers seulement, cette détermination peut être faite à partir de la seule connaissance de la structure relationnelle théorique.

ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES QUALITATIVES ET DES CARACTÉRISTIQUES QUANTITATIVES.

Depuis le début de notre étude les notions de qualité et de quantité ont été utilisées en tant qu'attributs pour spécifier certains aspects fondamentaux des caractéristiques servant à définir un objet quelconque, élément du système. Les règles auxquelles doivent obéir ces notions ont été précisées dès le chapitre I, et elles apparaissent en définition simple et claires. Mais il faut bien reconnaître que ces règles n'épuisent pas le contenu des notions considérées, et que ce contenu reste pour une large part intuitif. De là résultent un certain nombre de difficultés, en particulier en ce qui concerne les apparences que peuvent prendre certaines variations de caractéristiques, selon le niveau auquel on les observe ou auquel on les décrit. Il n'était guère possible de tenter d'apporter quelques éclaircissements sur ce point avant d'avoir examiné de manière détaillée les problèmes conceptuels liés à l'évolution des systèmes. Cela étant fait, nous pouvons maintenant aborder cette tentative.

Rappelons d'abord les règles dont il vient d'être question, et auxquelles doivent satisfaire respectivement les caractéristiques qualitatives et les caractéristiques quantitatives. Une caractéristique qualitative correspond à un prédicat dont on affirme seulement l'existence ou la non-existence dans un objet donné. Par exemple, lorsqu'on parle de charge électrique on introduit un concept qui est bien un prédicat qualitatif, en vertu duquel on peut dire qu'un objet possède ou ne possède pas de charge électrique. Une caractéristique quantitative correspond à un prédicat qualitatif. Il s'agit donc d'un nombre suivi affectée à un prédicat qualitatif, ou si l'on préfère à une mesure, d'une spécification qui indique l'unité choisie pour la mesure, cette unité représentant la grandeur attribuée à un objet choisi comme référence, relativement au même prédicat qualitatif.

En vertu de ces définitions, une caractéristique qualitative ne peut varier que par tout ou rien, le tout correspondant à l'affirmation

d'existence, le rien à l'affirmation de non-existence. Une caractéristique quantitative peut au contraire varier comme le nombre qui la représente, et ces variations peuvent en pratique apparaître continues ou discontinues. Tant que la caractéristique quantitative a une grandeur non nulle, même aussi petite que l'on voudra, l'existence du prédicat qualitatif correspondant reste affirmée. La non-existence de ce prédicat ne peut être affirmée que lorsque la grandeur considérée prend la valeur particulière zéro. En pratique, cependant, nous ne pouvons faire la différence entre la valeur zéro et les valeurs négligeables ou non repérables, par nos moyens d'observation. On voit par là que les affirmations relatives aux prédicats qualitatifs pourront être, au moins dans certains cas, très dépendantes de nos moyens d'observation et de leur précision.

Les considérations pratiques qui précèdent font déjà apparaître une certaine incertitude en ce qui concerne les prédicats qualitatifs que nous attribuons à un objet quelconque. Mais d'autres facteurs interviennent également dans ce sens. Les caractéristiques attribuées à un élément sont, comme nous l'avons vu, obtenues par induction à partir de la connaissance des interactions auxquelles peut participer l'élément, c'est-à-dire des fonctions qu'il remplit vis-à-vis d'autres éléments. Plus précisément, les prédicats qualitatifs résultent en premier lieu des séparations que nous nous efforçons de réaliser dans les phénomènes plus ou moins complexes observés, jusqu'à ce que nous aboutissions à la mise en évidence de fonctions aussi simples que possible, c'est-à-dire de fonctions exprimables à l'aide d'un nombre de caractéristiques aussi restreint que possible. Dans une opération de ce genre, comme dans toute opération inductive, il est en toute rigueur impossible d'affirmer que la démarche suivie est la seule réalisable, ou qu'elle est la meilleure. Dans la plupart des cas, et surtout lorsque interviennent des interactions très complexes, différentes voies inductives peuvent se présenter, aboutissant à l'attribution de prédicats qualitatifs différents aux éléments. Nous sommes ici devant une difficulté qui laisse bien apparaître le caractère relatif que peuvent prendre nos choix concernant les prédicats qualitatifs. Mais il s'agit pour le moment d'une simple constatation empirique. Les causes profondes de cette ambiguïté au niveau de l'élément ne peuvent transparaître qu'à partir d'une analyse du niveau sous-jacent, qui est celui d'un système. Nous reprendrons donc ce problème après avoir examiné de manière plus détaillée comment se présentent les rapports entre caractéristiques qualitatives et caractéristiques quantitatives pour un même objet, considéré d'une part au niveau global, et d'autre part au niveau du système qu'il constitue.

Les difficultés qui viennent d'être mentionnées n'ont trait qu'au choix des prédicats qualitatifs. Elles ne mettent pas en cause, tout au moins directement, les liens de dépendance entre caractéristiques qualitatives et caractéristiques quantitatives. En ce qui concerne cette dépendance, nous n'avons rencontré jusqu'à présent que des relations qui constituent en quelque sorte des conditions aux limites

apparemment claires et précises, à savoir l'existence préalable nécessaire d'un prédicat qualitatif comme support de toute caractéristique quantitative, et en sens inverse la disparition du prédicat qualitatif lorsque la caractéristique quantitative qui lui est associée prend la valeur particulière zéro. Un certain nombre de faits, que nous allons évoquer maintenant, montrent pourtant que la dépendance entre les notions de qualité et de quantité doit être plus complexe que ne le laissent paraître ces conditions limites. Il peut donc s'avérer nécessaire de modifier, ou pour le moins de préciser davantage, l'énoncé de ces conditions.

Il est généralement admis que certaines variations quantitatives peuvent entraîner des transformations qualitatives. D'un point de vue purement empirique, cette affirmation est sans aucun doute justifiée, et elle traduit un grand nombre de faits d'observation courante, et même banale. Par de simples variations de température, réalisables par un apport ou un retrait de quantités de chaleur, un corps peut être placé dans l'un des états, solide, liquide, ou gazeux, et ces états nous apparaissent bien qualitativement différents. L'eau, nécessaire à la fertilité du sol, peut aussi, par un excès quantitatif, rendre celui-ci impropre à toute culture. La chaleur solaire, indispensable à la vie végétale, peut aussi par excès quantitatif détruire toute végétation. Telle substance chimique, médicalement curative à certaines doses, peut devenir toxique à d'autres doses. Qu'il s'agisse de domaines où nos observations sont les plus grossières, ou de secteurs que nous explorons scientifiquement, les exemples de ce type abondent. Mais s'il est impossible de nier l'existence de tels faits, leur interprétation du point de vue conceptuel se heurte néanmoins à des difficultés certaines. Il nous semble en effet que ces phénomènes s'inscrivent en contradiction avec le contenu intuitif que nous accordons spontanément aux notions de qualité et de quantité, et cela surtout si l'on parle à ce sujet d'une sorte de transformation du qualitatif en qualitatif. Il est vrai qu'une expression comme celle-là, à la fois trop catégorique et trop vague, prête à confusion. Quoi qu'il en soit, notre sentiment d'une contradiction interne semble bien provenir, en dernier ressort, de la manière dont nous concevons intuitivement les problèmes de genèse dans leur application aux diverses catégories de notre entendement. Une qualité, par le caractère de permanence qui lui correspond à travers les variations possibles de la caractéristique quantitative qui lui est associée, nous apparaît comme une donnée première. Nous sommes donc portés à voir dans la relation entre prédicat qualitatif et caractéristique quantitative, quelque chose qui ressemble de très près à une relation de cause à effet. Nous admettons sans difficulté que l'existence de la caractéristique quantitative soit conditionnée par l'existence préalable du prédicat qualitatif, mais la relation inverse nous apparaît spontanément moins compréhensible. Nous sommes prêts également à admettre qu'une qualité naît d'autres qualités, mais nous comprenons moins facilement que l'apparition de cette qualité nouvelle puisse être provoquée par de

simples variations quantitatives liées à d'autres prédicats qualitatifs. Nous allons voir cependant que cette position n'est pas soutenable, et qu'il est nécessaire de reconnaître une dépendance réciproque, et non unilatérale, entre prédicat qualitatif et caractéristique quantitative.

Supposons que, dans le monde que nous observons à un instant donné t_0 , existent un certain nombre de prédicats qualitatifs $a_1, a_2, \dots, a_i$. Un nouveau prédicat qualitatif a_0 peut-il apparaître à un instant ultérieur t , et à quelles conditions ? Si nous admettons que l'existence de a_0 ne peut avoir pour cause que l'existence d'autres prédicats qualitatifs, nous sommes obligés d'admettre que l'apparition de a_0 s'est produite en même temps que celle des prédicats a_i dont il dépend, et que a_0 existait donc déjà au temps t_0 . En effet, si a_0 ne dépend que de l'existence des a_i , il doit apparaître dès que cette existence est affirmée. Si nous supposons maintenant que a_0 est un prédicat indépendant, c'est-à-dire ne dépendant d'aucun prédicat qualitatif préexistant, nous ne pouvons reconnaître à son apparition que le caractère d'une création *ex-nihilo*, et cela entraîne en particulier le fait que l'époque de cette apparition est arbitraire. En définitive, l'apparition de chaque prédicat qualitatif indépendant, ou de chaque groupe de prédicats qualitatifs dépendant les uns des autres, peut dans cette optique intervenir à un instant quelconque, apparemment arbitraire c'est-à-dire non relié à un déterminisme connaissable. Il ne reste alors que deux hypothèses possibles concernant l'époque de ces créations *ex-nihilo*, mais toutes deux conduisent à des contradictions difficilement surmontables.

Si l'on admet que l'apparition de nouveaux prédicats qualitatifs peut se produire à n'importe quelle époque, la connaissance scientifique de la nature est parfaitement illusoire puisqu'elle peut être remise en cause à chaque instant, et cela d'une manière tout à fait fondamentale, c'est-à-dire d'une manière qui ne touche pas seulement aux modes de description que nous choisissons, ni à la précision de nos observations. Dans l'état actuel de nos connaissances, rien ne permet d'étayer une telle hypothèse.

Si l'on admet que l'apparition de toutes les données qualitatives s'est produite dans le passé, que ce soit en une ou en plusieurs opérations, la connaissance scientifique de la nature est possible. Ce que nous appelons l'apparition d'une nouvelle caractéristique qualitative ne serait alors que la découverte d'une réalité préexistante, auparavant cachée par suite de l'insuffisance de nos moyens d'observation. Mais cette hypothèse exclut également les changements de structure qui sont bien, comme nous le verrons bientôt, des variations qualitatives. De tels changements étant d'observation courante, la seconde hypothèse doit donc être également rejetée. Tout au plus pourrait-on reconnaître éventuellement l'existence de deux catégories de données qualitatives, les unes n'étant susceptibles ni d'apparition ni de disparition, les autres pouvant apparaître et disparaître. L'examen des caractéristiques des systèmes nous montrera qu'il s'agit là d'une

conjecture possible, mais qui ne nous apprend rien sur les relations entre les notions de qualité et de quantité.

Notons au passage que la découverte de caractéristiques qualitatives préexistantes, ainsi que nous venons de le mentionner, constitue un fait scientifique très courant. Cela peut résulter, soit d'une amélioration de la finesse de nos moyens d'observations, soit de l'exploration d'une nouvelle gamme de valeurs pour les caractéristiques quantitatives $q_1, q_2, \dots, q_i$ dont dépend la grandeur q_0 associée au prédicat qualitatif nouvellement observé. En effet, s'il existe une relation :

$$q_0 = f(q_1, q_2, \dots, q_i)$$

il peut arriver que q_0 soit négligeable pour certaines gammes de valeurs des $q_1, q_2, \dots, q_i$, et ne devienne décelable que lorsque ces grandeurs sont situées dans d'autres gammes. Ce n'est que d'un point de vue empirique que nous pouvons alors parler de l'apparition du prédicat qualitatif a_0 lié à la grandeur q_0 , comme conséquence des variations quantitatives opérées sur $q_1, q_2, \dots, q_i$. D'un point de vue théorique, cela ne nous apprend rien sur la genèse de a_0 . Même si l'on est parvenu à expliciter la fonction f avec un degré convenable de vraisemblance théorique, il suffit que q_0 s'annule en même temps que les grandeurs $q_1, q_2, \dots, q_i$ pour que le problème de la genèse de a_0 se confonde avec celui des prédicats qualitatifs associés $a_1, a_2, \dots, a_i$. L'apparition de a_0 n'est alors en fait que la découverte d'un prédicat qualitatif préexistant, ce qui est fondamentalement différent de l'apparition d'une donnée qualitative véritablement nouvelle. Pour reprendre un exemple déjà cité, et sans préjuger de la validité de notre hypothèse dans ce cas particulier, on peut concevoir que les effets qualitativement opposés de l'intensité solaire, pour le développement et pour la destruction de la végétation, coexistent pour toutes les gammes d'intensité mais que leur importance relative varie selon ces gammes. Dans d'autres cas en revanche, dont nous verrons bientôt les conditions précises, certaines variations purement quantitatives peuvent entraîner de véritables variations qualitatives. Le fait de ne pas distinguer explicitement ces deux types de phénomènes très différents, lorsque l'on parle du passage du quantitatif au qualitatif, ajoute à la confusion dans un problème qui présente déjà une difficulté conceptuelle certaine.

Considérons maintenant le cas d'un objet quelconque que nous supposons défini, d'une part au niveau global, c'est-à-dire en tant qu'élément, et d'autre part au niveau du système interne qu'il constitue. Après avoir rappelé comment se présentent les données qualitatives et quantitatives au niveau du système, nous examinerons quelles sont les relations possibles entre ces deux types de caractéristiques d'un niveau à l'autre.

Parmi les données qui permettent de définir entièrement un système, celles qui correspondent à des caractéristiques qualitatives sont déjà contenues, au moins en partie, dans le concept moins complet

de structure. Mais, selon l'acception que l'on donne à ce concept, il peut ne contenir que des prédicats qualitatifs ou inclure également certaines caractéristiques quantitatives. Cette situation est très instructive pour le problème qui nous occupe. Considérons d'abord la structure relationnelle. Définie uniquement par l'existence des classes-repères, et par l'existence et la nature (1) des relations entre classes, elle ne contient que des données qualitatives. Ses variations, qui correspondent à la disparition ou à l'apparition de classes et de relations entre classes, obéissent bien à un processus discontinu par « tout ou rien ». Considérons maintenant la structure totale. Nous savons qu'elle comporte, outre les données qui définissent la structure relationnelle, celles qui ont trait à la définition des classes-repères. Parmi ces classes, une distinction a été faite entre classes qualitatives et classes quantitatives. Les premières correspondent aux divers ensembles de prédicats qualitatifs que l'on peut trouver associés dans les éléments du système. Mais une classe qualitative peut être subdivisée en sous-classes quantitatives si l'on distingue les éléments qui, présentant les mêmes ensembles de prédicats qualitatifs, se différencient par des valeurs ou des gammes de valeurs différentes des caractéristiques quantitatives associées. D'une manière générale, la structure totale comprend donc à la fois des caractéristiques qualitatives et des caractéristiques quantitatives, et pourtant elle correspond bien elle-même à une notion qualitative, et elle subit les mêmes types de variations discontinues que la structure relationnelle. La contradiction que nous croyons déceler dans cette situation va, en réalité, nous conduire au cœur du problème des relations entre qualités et quantités. Le fait de retenir certaines caractéristiques quantitatives, pour distinguer les éléments entre eux et les répartir en différentes classes, n'a en soi rien d'anormal puisque une telle partition présente toujours une part de libre choix. Rien ne nous interdit d'opérer ainsi pour affiner les distinctions. La seule discordance apparente provient de ce que la partition, même réalisée de cette manière, nous apparaît malgré tout comme une opération qualitative. Et cette impression est renforcée par le caractère discontinu des variations qu'est susceptible de subir, comme toute donnée qualitative, la structure totale. Il serait tentant de dire que cette discordance ne correspond à rien de fondamental, que notre compréhension intuitive de la notion de qualité est juste, et que le fait d'introduire certaines données quantitatives pour distinguer les éléments entre eux constitue une adjonction du second ordre, sans grande importance. Il est certain en effet que, dans notre esprit, la notion de différence est souvent associée à celle de qualité, les différences qualitatives nous apparaissant toujours plus significatives que les différences quantitatives.

(1) Rappelons que la nature des relations est définie d'une manière tout à fait générale : relations de transfert, relations topologiques, relations d'ordre. Il s'agit donc bien d'une donnée qualitative.

En réalité nous verrons que, dans ce cas, c'est bien notre compréhension intuitive de la notion de qualité qui est en défaut, et que la partition en classes quantitatives est une opération non seulement légitime, mais même très significative d'un point de vue fondamental. Mais il nous faut auparavant étudier les relations susceptibles d'exister entre le niveau du système et le niveau de l'élément global, pour les deux catégories de caractéristiques. Constatons simplement, pour le moment, que les variations de la structure totale correspondent, lorsqu'elles mettent en jeu des classes quantitatives, à l'apparition ou à la disparition de valeurs ou de gammes de valeurs possibles pour certaines caractéristiques quantitatives des éléments.

Considérons donc maintenant un objet quelconque défini, d'une part au niveau global par les prédicats qualitatifs $a_1, a_2, \dots, a_i$ auxquels sont associées les caractéristiques quantitatives $q_1, q_2, \dots, q_i$, et d'autre part au niveau d'un système sous-jacent dans lequel les éléments constitutifs sont définis à l'aide des prédicats qualitatifs $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j$ et des caractéristiques quantitatives associées $k_1, k_2, \dots, k_j$. Notons que les caractéristiques q ou k représentent chacune, soit une valeur unique, soit un ensemble de valeurs, selon les variations possibles de ces grandeurs dans les conditions où nous considérons l'objet. Le problème est de savoir quels sont les rapports possibles entre les diverses caractéristiques de l'un à l'autre niveau. On doit d'abord remarquer que les caractéristiques quantitatives des éléments constitutifs du système apparaitront également en tant que caractéristiques qualitatives au niveau global. Par exemple, si les éléments du système sont doués de masse, le système considéré globalement sera aussi doué de masse. Il peut y avoir des exceptions à cette règle si certaines caractéristiques quantitatives des éléments du système se combinent de telle manière qu'elles donnent une grandeur nulle au niveau global. Dans ce cas, le prédicat qualitatif correspondant disparaît au niveau global, tout au moins du point de vue pratique. Par exemple, si les éléments du système portent des charges électriques de signes contraires, leur combinaison additive peut donner une charge nulle au niveau de l'ensemble. Le prédicat qualitatif « charge électrique » n'apparaîtra pas au niveau de l'objet global. D'une manière générale on peut donc dire qu'une partie au moins des prédicats qualitatifs des éléments du système, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j$ seront inclus dans l'ensemble des prédicats qualitatifs correspondant au niveau global, $a_1, a_2, \dots, a_i$. Mais pour répondre à la question qui nous occupe, il faut quitter ce point de vue statique des correspondances et examiner comment une variation donnée peut se transposer d'un niveau à l'autre.

Supposons que certains changements qualitatifs se produisent au niveau des éléments du système, c'est-à-dire que des éléments changent de classes qualitatives. On sait que de telles classes ne sont distinctes que si elles sont définies par des ensembles différents de prédicats qualitatifs. La figure 27 donne un premier exemple dans lequel les éléments de la classe E_1 , définie par les prédicats qualitatifs $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, passent dans les classes E_2 et E_3 définies respectivement

par α_1 et par α_1, α_2 . Nous ne tiendrons pas compte pour le moment des variations quantitatives qui peuvent accompagner ces changements qualitatifs. A chaque transfert d'élément de la classe E_1 vers les classes E_2 ou E_3 , il se produit bien un changement qualitatif au niveau de l'élément transféré, mais la variation observée au niveau global ne peut pas apparaître qualitative. En effet, tant que la classe E_1 n'est pas vide, les trois prédicats $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ continuent d'exister et sont donc en principe décelables au niveau global. Du point de vue théorique, ce n'est que lorsque la classe E_1 se vide de son dernier élément que le prédicat α_3 disparaît, entraînant une variation qualitative au niveau global. On constate que cet événement correspond à une variation qualitative, non plus seulement au niveau des éléments du système, mais simultanément au niveau du système lui-même, par la disparition de la classe E_1 et des liaisons qui lui sont associées, entraînant ainsi un changement de la structure totale du système.

Considérons maintenant le cas où des changements purement quantitatifs se produisent au niveau des éléments du système. La figure 28 donne un exemple dans lequel les classes E_1, E_2, E_3 sont définies par les mêmes prédicats qualitatifs α_1, α_2 . Pour chacune de ces classes, et à chacun des prédicats, sont associées des valeurs ou des gammes de valeurs différentes des caractéristiques quantitatives k . Il semble *a priori* que les changements qui s'opèrent au niveau des éléments du système, et même à la limite au niveau du système par

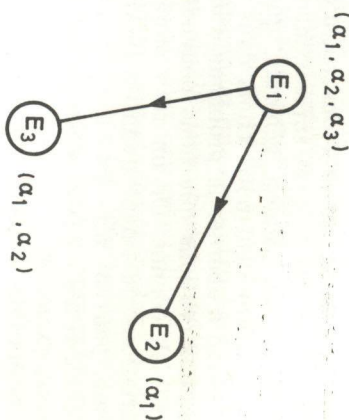


Fig. 27

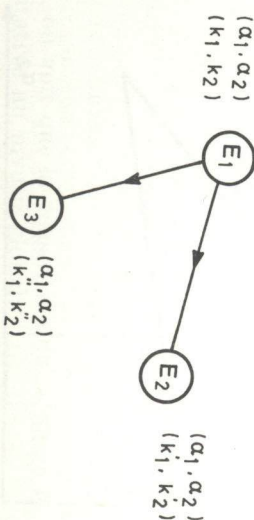


Fig. 28

la disparition de la classe E_1 , ne peuvent apparaître au niveau global que sous la forme de changements quantitatifs puisque aucun des prédicats qualitatifs α_1 , α_2 ne disparaît. En réalité, le point de vue théorique *a priori* n'est plus suffisant ici pour savoir sous quelle forme apparaîtront effectivement les changements au niveau global. Cela provient du fait que le choix des prédicats qualitatifs à ce niveau résulte, comme nous l'avons vu, d'opérations inductives qui n'obéissent pas à des critères suffisamment précis pour que nous puissions savoir, d'une manière générale, quelles sont les distinctions exactes qui conditionnent notre choix dans ce domaine. Notre seule ressource est donc d'aborder le problème d'un point de vue pratique, à partir des observations que nous pouvons faire sur un certain nombre de cas bien connus. Or, un tel examen nous montre très vite que des variations purement quantitatives, au niveau des éléments du système, peuvent être traduites sous une forme qualitative au niveau global. Il n'est pas nécessaire pour s'en convaincre d'étudier de nombreux exemples.

Supposons d'abord que les éléments du système de la figure 28 soient représentables par des points géométriques dans un plan. Les prédicats α_1 et α_2 correspondent aux deux axes de référence choisis dans ce plan, et les caractéristiques k_1 et k_2 représentent les gammes de valeurs que peuvent prendre les coordonnées des points. Ces coordonnées, à l'intérieur d'une même classe, peuvent être liées par une relation de dépendance. Par exemple, si la relation de dépendance est linéaire, chacune des classes E_1 , E_2 , E_3 , sera représentable dans le plan par un segment de droite dont les composantes couvrent sur chaque axe de coordonnées la gamme des valeurs possibles pour la caractéristique k correspondante. La figure 29 donne un exemple

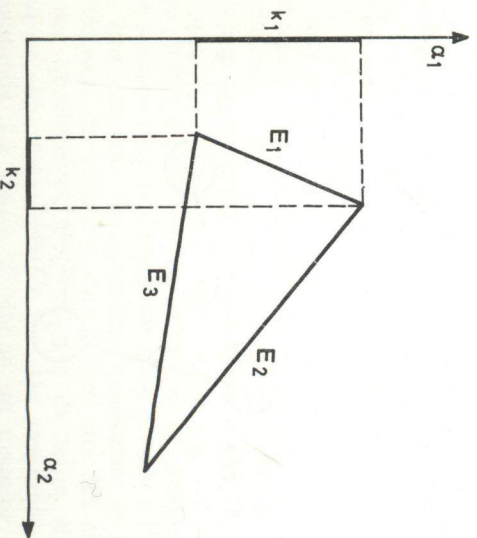


Fig. 29

dans lequel les trois classes considérées sont représentées par des segments de droites formant globalement un triangle. On voit immédiatement que si la classe E_1 disparaît, le triangle est réduit aux deux segments de droites concurrentes E_2 et E_3 , ce qui correspond bien à ce que nous appelons habituellement un changement qualitatif. Il faut noter d'ailleurs que si les variations au niveau des éléments du système sont purement quantitatives, le changement qui intervient au niveau du système lorsque disparaît la classe E_1 est bien un changement qualitatif puisqu'il se produit alors une modification de la structure totale du système, et que cette structure totale correspond elle-même à une notion qualitative. Si les coordonnées k_1 et k_2 à l'intérieur de chaque classe ne sont pas entre elles dans une relation de dépendance, les différentes classes correspondent à des figures quadrangulaires représentant les zones du plan occupées par les variations possibles des coordonnées. La figure 30 correspond à ce

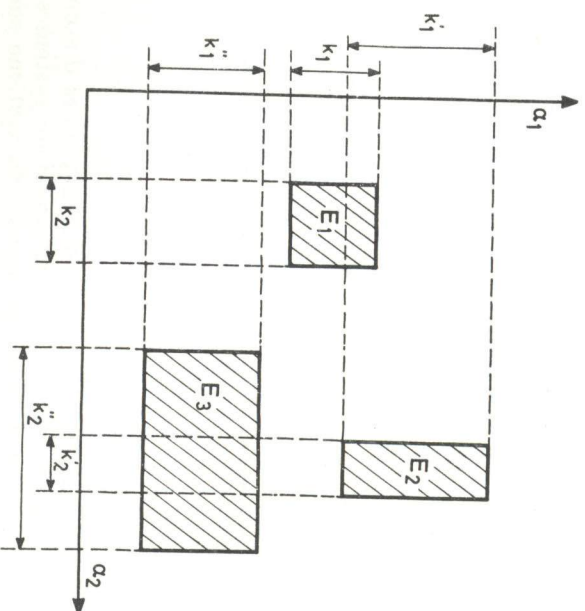


Fig. 30

cas. Ici encore, on voit que la disparition de la classe E_1 entraîne une variation qualitative au niveau global.

Ces exemples montrent également que si certaines variations quantitatives au niveau des éléments du système peuvent apparaître sous une forme qualitative au niveau global, il ne s'agit pas là d'une règle générale. Certaines de ces variations peuvent apparaître quantitatives

aux deux niveaux. La figure 31 donne un exemple dans lequel la disparition de la classe E_1 n'apparaît sans doute que sous la forme d'un changement quantitatif, même si le caractère discontinu de ce changement est apparent au niveau global. Les conclusions auxquelles nous parviendrons tout à l'heure nous montreront cependant qu'un tel changement peut parfois être traduit en termes qualitatifs au niveau global. Tout dépend, en dernier ressort, de la manière dont se combinent les caractéristiques quantitatives des éléments du système pour nous apparaître au niveau global, et de l'incidence qu'ont les variations quantitatives à ce niveau sur les interactions susceptibles d'intervenir entre les objets étudiés à ce niveau.

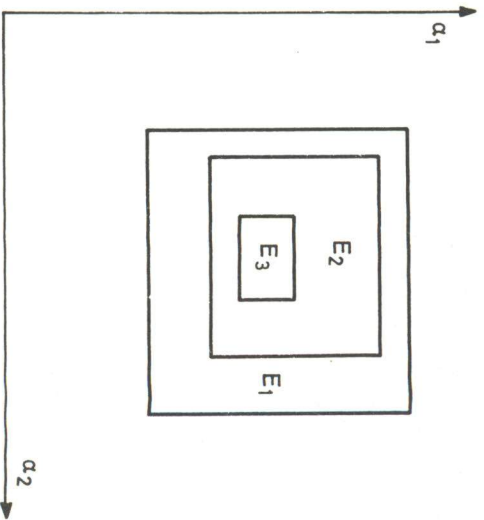


Fig. 31

Considérons maintenant le cas des différents types d'atomes et de molécules, qui constituent une autre catégorie de systèmes. On sait qu'un tel objet peut être décrit, au niveau du système sous-jacent, par l'existence d'un noyau et par l'existence d'un certain nombre d'électrons situés à différents niveaux énergétiques. Du point de vue qui nous intéresse ici, les éléments constitutifs du système sont des électrons. Selon la finesse de la théorie que l'on veut faire, les prédicats qualitatifs retenus pour la définition des classes-repères peuvent être seulement la masse de l'électron, sa charge électrique, et son niveau énergétique, ou inclure d'autres caractéristiques comme le spin ou le moment magnétique. Certaines des caractéristiques quantitatives associées sont considérées comme constantes ; c'est le cas de la masse et de la charge électrique. D'autres, comme le niveau énergétique

et le spin, sont considérées comme variables. Dans le cadre des théories les plus fines, chaque classe ne peut être occupée que par un seul électron. Les différents types d'atomes et de molécules correspondent à l'occupation de certaines classes bien déterminées et, à chaque système dans un état stable correspond une structure topologique et une structure d'ordre que l'on peut définir à partir des niveaux énergétiques des électrons. Les changements susceptibles d'intervenir, par exemple lors de l'excitation d'un atome ou lors de la combinaison chimique de plusieurs atomes, se traduisent dans le système réel par la disparition et par l'apparition de certaines classes-repères. Tous ces changements sont, au niveau des électrons, purement quantitatifs mais ils apparaissent au niveau global sous des aspects que nous n'hésitons pas à dire qualitatifs. Comme dans les exemples précédents ces changements quantitatifs au niveau des éléments du système, sont qualitatifs au niveau du système par suite de la variation subie par la structure totale, comme ils le sont au niveau global.

Nous voyons donc que les changements qualitatifs observés au niveau global correspondent en général à des variations de la structure totale du système sous-jacent. Mais la réciproque n'est pas toujours vraie, et certaines variations de la structure totale du système peuvent ne pas apparaître au niveau global, ou apparaître seulement sous la forme de variations quantitatives. Ce point, qui n'a été que brièvement mentionné à propos de la figure 31, mérite d'être quelque peu explicité. Considérons, par exemple, le système de la figure 32

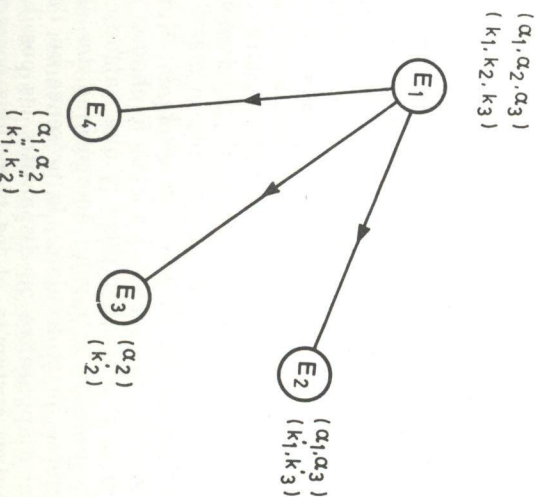


Fig. 32

dans lequel les éléments subissent à la fois des variations qualitatives, mais sans disparition du prédicat, et des variations quantitatives. Soit a_1 le prédicat qualitatif qui, au niveau global, correspond à α_1 , et soit q_1 la caractéristique quantitative qui lui est associée. Lors de l'évolution du système, ce que nous allons observer au niveau global dépend à la fois de la manière dont les caractéristiques k_1, k'_1, k''_1 se combinent pour donner q_1 , et de la signification de a_1 en ce qui concerne les interactions possibles du système considéré globalement. Tant qu'aucune des classes E_1, E_2, E_3, E_4 n'est vide, le prédicat a_1 et la caractéristique q_1 résultent de la répartition des valeurs ou des gammes de valeurs k_1, k'_1, k''_1 sur l'axe représentant le prédicat a_1 (Fig. 33 (a)). Lorsque la classe E_1 est vide, seules les gammes k'_1 et k''_1 interviennent encore (Fig. 33 (b)). Si la présence de la gamme k_1 est nécessaire pour que certaines interactions sélectives du système se produisent, la variation de la structure totale par disparition de la classe E_1 apparaîtra comme qualitative au niveau global.

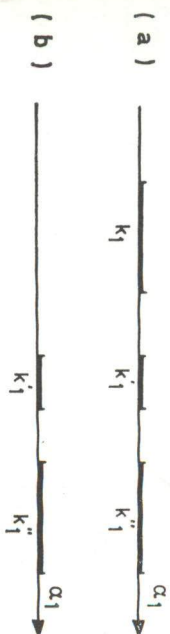


Fig. 33

Si au contraire les interactions possibles du système ne présentent aucune sélectivité relative aux grandeurs associées à α_1 et a_1 , la variation qualitative de la structure totale n'apparaîtra pas comme un processus qualitatif discontinu au niveau global, mais constituera éventuellement la fin d'un processus de variation quantitative. Il est même possible que, dans certains cas, le transfert d'éléments de E_1 vers E_2, E_3, E_4 , ne se traduise par aucune variation quantitative au niveau global, si la combinaison de k_1, k'_1, k''_1 donne pour q_1 une valeur constante. Par exemple, si α_1 représente la masse des éléments et a_1 la masse du système, la combinaison des k_1, k'_1, k''_1 , qui fait intervenir aussi le nombre d'éléments présents à chaque instant dans chacune des classes, peut donner pour q_1 une valeur constante. En revanche, si α_1 représente le niveau énergétique des électrons dans un système atomique ou moléculaire, la présence ou l'absence de la classe E_1 peut faire apparaître ou disparaître les possibilités d'interactions avec d'autres systèmes, et les variations correspondantes de la structure totale se traduiront alors par des changements qualitatifs au niveau global.

En définitive, les changements qualitatifs observés au niveau d'un élément considéré globalement apparaissent toujours réductibles à des variations de la structure totale du système sous-jacent. Et ces variations de la structure totale peuvent mettre en jeu aussi bien des classes qualitatives que des classes purement quantitatives.

Une première remarque importante à faire à propos de ce résultat, c'est que celui-ci ne dépend pas de la manière dont nous pouvons décrire le système sous-jacent. Il est utile de mettre l'accent sur ce point, surtout après l'insistance que nous avons mise au cours des chapitres précédents pour montrer le caractère relatif de notre description d'un système quelconque, par suite de notre liberté de choix dans la partition initiale en classes-repères. Ceci pourrait prêter à confusion en laissant sous-entendre que la disparition d'une classe-repère n'apparaîtra effectivement comme une variation qualitative au niveau global et au niveau du système, que si cette classe a été discriminée dans la partition initiale, et non pas si elle est restée incluse, par une différenciation insuffisante, dans une classe plus large qui ne disparaît pas complètement dans le processus envisagé. Il est évident qu'il n'en est rien, et que le fait d'observer une variation qualitative au niveau global ne dépend en rien de la manière dont nous décrivons le système sous-jacent. Le problème qui est ici évoqué touche en réalité à une question voisine de celle-là, mais nettement différente, et qui concerne l'adéquation ou la correspondance des descriptions adoptées aux deux niveaux. Si la description au niveau du système n'est pas assez différenciée, une variation qualitative observée au niveau global peut ne pas apparaître au niveau du système. À l'inverse, si la description du système est très différenciée, une variation qualitative à ce niveau par disparition de classe peut apparaître insignifiante ou même indécélable au niveau global. L'exemple de la figure 29 permet d'illustrer facilement de telles situations. Si la classe E_1 est subdivisée en classes quantitatives très étroites, la disparition de l'une d'elles entraînera bien toujours une variation qualitative au niveau de la figure globale puisque l'une des faces du triangle sera alors incomplète, mais si la classe qui disparaît est très étroite le changement qualitatif au niveau global pourra passer inaperçu ou être considéré comme négligeable. En revanche, si les deux classes E_1 et E_2 sont confondues en une seule, les droites correspondantes seront remplacées par une droite unique qui, au cours de l'évolution du système, se déplacera en tendant vers la droite E_2 . La disparition de la classe E_1 apparaîtra au niveau global comme la fin d'un processus quantitatif de rotation et d'homothétie.

Une seconde remarque s'impose au sujet des résultats obtenus. Les raisonnements qui nous ont permis de relier les changements au niveau d'un objet considéré globalement et au niveau d'un système sous-jacent, peuvent être répétés à propos des éléments constitutifs de ce système, qui sont encore des objets considérés globalement. Il est ainsi possible, en principe, de descendre progressivement à des

niveaux de description de plus en plus fins, en tenant compte des divers systèmes imbriqués les uns dans les autres. À chacune de ces étapes, les variations qualitatives observées à un niveau donné apparaîtront réductibles, au niveau inférieur, à un certain nombre de variations quantitatives et à un certain nombre de variations qualitatives. Ainsi, on doit s'attendre à ce que, pour rendre compte des variations qualitatives observées à un niveau donné, le nombre nécessaire de variations qualitatives attribuées aux éléments des systèmes sous-jacents soit de plus en plus faible. À la limite, on doit atteindre un niveau où les éléments du système sont définis à partir de prédicats qualitatifs qui nous apparaissent stables, et où seules les caractéristiques quantitatives associées sont variables. C'est ce que l'on pourrait appeler le niveau du *système qualitativement stable*, ou du *système fondamental*. Mais cette seconde expression risque d'entraîner des confusions puisque le niveau qualitativement stable peut être différent selon les interactions auxquelles peut être soumis l'élément global.

À vrai dire, la décroissance du nombre de variations qualitatives différentes, ou du nombre de prédicats qualitatifs nécessaires, au fur et à mesure que l'on descend vers des niveaux de description plus fins, n'est pas une règle générale. Il peut arriver qu'entre deux niveaux successifs apparaisse une variation en sens contraire, mais cela se produit surtout lorsque l'on cherche à rendre compte, au niveau le plus fin, de phénomènes qui peuvent être considérés comme négligeables ou secondaires au niveau le plus global. En tout cas l'évolution de notre interprétation des lois du monde matériel montre bien que l'on parvient en définitive à un niveau qualitativement stable. Pour toutes les transformations qui ne mettent pas en jeu les noyaux, les systèmes d'électrons correspondant aux atomes et molécules constituent bien de tels systèmes, ainsi que nous l'avons vu. Il faut dire d'ailleurs que cette situation apparaît en définitive tout à fait normale, et qu'il est certainement légitime de la généraliser, ne serait-ce qu'à titre de conjecture très probable. En effet, à chaque passage d'un niveau global à un niveau de système sous-jacent, les possibilités offertes par les variations de structure totale pour rendre compte des changements qualitatifs s'accroissent. Et puisque ces variations de structure totale concernent, au moins en partie, des classes purement quantitatives, il est normal que les variations de classes qualitatives nécessaires pour expliquer les phénomènes décroissent parallèlement. Admettre le contraire conduirait à dire qu'une variation qualitative à un niveau global correspond, d'une manière générale, à plusieurs apparitions ou disparitions *simultanées* de prédicats qualitatifs au niveau des éléments constitutifs du système sous-jacent, ce qui est en contradiction avec toutes les observations que l'on peut faire. Enfin, cela entraînerait une difficulté accrue de généralisation théorique au fur et à mesure que l'on descendrait à des niveaux de description plus fins, ce qui est en flagrante contradiction avec ce que l'histoire des sciences nous permet de constater dans tous les

domaines. Ce point sera repris de manière plus détaillée dans le prochain chapitre.

On remarquera que les conclusions auxquelles nous sommes parvenus, et qui relient les variations qualitatives à des variations du recouvrement numérique possible pour les caractéristiques quantitatives associées aux prédicats qualitatifs stables, précisent et constituent une généralisation de ce que nous avons admis antérieurement quant aux relations d'existence entre prédicats qualitatifs et caractéristiques quantitatives. La figure 34 représente les conditions initialement

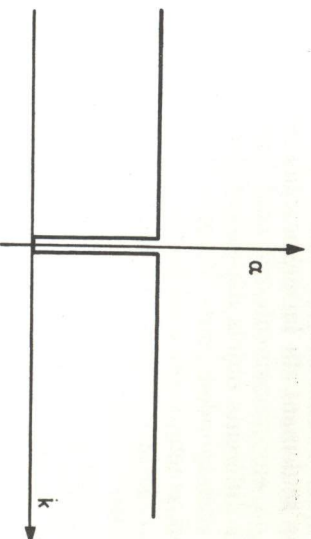


Fig. 34

admisses. Le prédicat qualitatif α , dont l'existence est ici symbolisée par une ordonnée constante arbitraire, et la non-existence par l'ordonnée nulle, n'était alors supposé disparaître que pour la valeur nulle de la caractéristique quantitative associée k . Ceci revenait implicitement à admettre que toutes les valeurs numériques étaient possibles pour k , ce qui est loin d'être toujours le cas. La figure 35 représente les nouvelles conditions obtenues. Ici le prédicat qualitatif est considéré comme non existant dans les zones numériques que ne

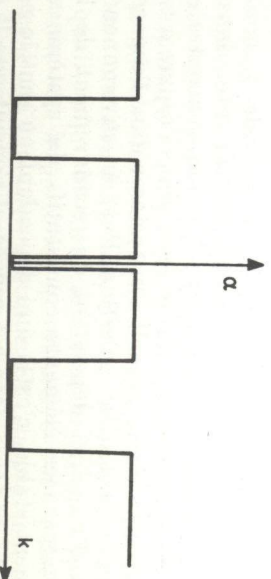


Fig. 35

peut pas occuper la caractéristique quantitative qui lui est associée. Ces conditions sont, d'un point de vue logique, beaucoup plus satisfaisantes.

A différentes figures de recouvrement possible de la droite numérique par la caractéristique k associée au prédicat stable peuvent correspondre des prédicats qualitatifs différents aux niveaux d'observation plus globaux. Si l'on tient compte de tous les prédicats qualitatifs nécessaires à la description du système qualitativement stable, les caractéristiques qualitatives de l'objet considéré sont ainsi reliées au recouvrement qui lui correspond dans l'espace de configuration du système. En réalité, puisque les propriétés d'un objet ne dépendent pas seulement de lui-même mais aussi des autres objets situés dans son environnement, on peut dire que les interactions possibles entre différents objets dépendent de recouvrements respectifs qui leur correspondent dans l'espace de configuration des systèmes qualitativement stables qu'ils constituent.

En définitive, les conclusions obtenues peuvent être résumées de la manière suivante :

Les changements qualitatifs observés sur un objet quelconque résultent de variations de la structure totale d'un système sous-jacent.

Ces variations de structure totale sont réductibles, en dernier ressort, à des apparitions ou disparitions de classes quantitatives situées au niveau d'un système sous-jacent qualitativement stable.

L'aspect qualitatif des fonctions d'un objet, ou la nature des interactions entre différents objets, dépend des recouvrements respectifs correspondant à ceux-ci dans l'espace de configuration qui permet de les décrire en tant que systèmes constitués d'éléments qualitativement stables.

Il ressort de ces conclusions que les fonctions d'un objet, propriétés intrinsèques et interactions avec d'autres objets, sont réductibles à des propriétés topologiques et sans doute aussi, au moins partiellement, à des propriétés métriques, dans l'espace de configuration du système qualitativement stable.

Il est à noter également que ces conclusions permettent de mieux comprendre la signification profonde, et les limites, des rapprochements fréquemment faits entre la forme spatiale d'un objet et ses fonctions. Et cela peut surtout présenter de l'intérêt dans le cas des systèmes très complexes, comme ceux que l'on rencontre en biologie. La forme spatiale représente la projection, dans l'espace à trois dimensions, de la structure relationnelle du système dans l'espace de configuration dont il vient d'être question. Pour un environnement donné, les fonctions d'un objet dépendant du recouvrement de l'espace de configuration par les éléments constitutifs du système sous-jacent qualitativement stable, c'est-à-dire dépendant au sens le plus général de la forme du système dans cet espace, il s'ensuit que la forme spatiale d'un objet est fondamentalement reliée à ses fonctions. Mais ce lien est évidemment incomplet et indirect, et cela d'autant plus que

le système considéré est plus complexe. En biologie, des disciplines telles que la morphologie, la physiologie, la biologie moléculaire, apparaissent ainsi comme des manières différentes, mais toujours partielles, de décrire les fonctions de systèmes d'une très grande complexité. Le fait que ces disciplines ne correspondent pas seulement à des langages différents capables de décrire les mêmes réalités, mais bien à des aspects partiels d'une réalité plus large, est implicitement reconnu par la nécessité où se trouve aujourd'hui la Systématique d'inclure dans ses critères de classification des données issues de ces divers domaines. Mais c'est encore l'embryologie qui permet de constater de la manière la plus évidente cette unité sous-jacente, par les observations très nombreuses auxquelles elle conduit en ce qui concerne les variations concomitantes aux niveaux moléculaire, physiologique, et morphologique.

Il est utile, avant de terminer ce chapitre, de faire un nouveau retour sur le couple « structure-fonction », en ce qui concerne ses aspects évolutifs. Nous savons que le terme « structure » contient des données différentes, selon que les fonctions considérées se rapportent aux seules propriétés intrinsèques du système ou aux interactions de celui-ci avec d'autres systèmes. Mais nous avons vu que la structure correspond dans tous les cas à une notion qualitative. Le terme « fonction », lui, contient à la fois des aspects qualitatifs et des aspects quantitatifs, les premiers regroupant ce que nous avons parfois appelé la nature des interactions, alors que les secondes expriment l'importance, l'intensité, de ces interactions. Cette différence entre les deux concepts réunis dans le couple « structure-fonction » peut être une source d'ambiguïtés, et donc de malentendus, en particulier en ce qui concerne les problèmes liés à l'évolution. Les différentes données contenues dans le concept de structure, classes-repères et relations entre classes, se voient implicitement accorder la même importance puisque l'on ne tient compte que de leur existence ou de leur non-existence. Pour la même raison, les variations que peut subir la structure au cours de l'évolution apparaissent discontinues. Le fait d'associer la notion de fonction à celle de structure, sans préciser d'avantage, pourrait laisser sous-entendre que les fonctions subissent les mêmes variations discontinues. On conclurait de cela que l'évolution doit se présenter, d'une manière générale, comme une suite d'états discontinus qu'il est difficile, sinon impossible, de relier entre eux par des relations de cause à effet puisque toute variation discontinue semble correspondre à l'intervention instantanée d'une cause extérieure non prévisible. En réalité, les phénomènes se présentent généralement d'une manière différente. S'il est vrai qu'une fonction, dans son aspect qualitatif, subit des variations de même type que celles de la structure, son importance quantitative peut présenter toutes les apparences d'une évolution continue. Et cela provient évidemment du fait que l'aspect qualitatif d'une fonction ne dépend pas seulement de la nature des éléments qui y participent, mais aussi du nombre de ces éléments. La disparition ou l'apparition d'une fonction

est ainsi très souvent progressive, pour peu que l'on considère une échelle de temps convenable. D'un point de vue pratique, il est alors normal de considérer surtout cette évolution progressive dans la gamme où la fonction prend des valeurs appréciables, plutôt que de mettre l'accent sur l'apparition ou la disparition qualitative de cette fonction dans une gamme où elle est quantitativement négligeable.

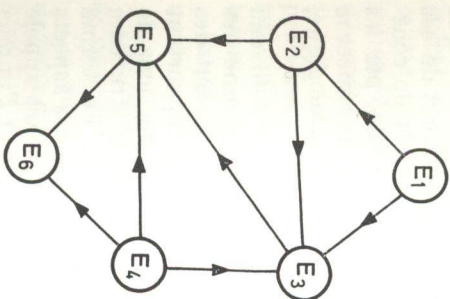


Fig. 36

tensité de chacune de ces fonctions dépend à chaque instant du nombre d'éléments présents dans les classes correspondantes, comme c'est généralement le cas. Si l'on tient compte de l'importance relative de ces différentes fonctions, il est possible que le système nous apparaisse à diverses époques avec des structures différentes. La figure 37 donne trois exemples de structures décelables ou apparentes, selon l'époque de l'évolution ; f_1 , f_2 , f_3 représentent les intensités respectives des trois fonctions considérées.

Bien que la structure totale du système reste stable pendant toute cette phase de l'évolution, tout se passe comme si l'on progressait insensiblement d'une structure partielle à l'autre, les fonctions correspondantes apparaissant ou disparaissant progressivement, selon le nombre d'éléments contenus dans les différentes classes. Pour mettre en évidence ce phénomène d'évolution progressive, la notion de structure n'est plus suffisante. Il est nécessaire de faire intervenir les caractéristiques quantitatives des classes et des relations entre classes, c'est-à-dire en définitive la notion de système.

Pour éviter toute équivoque à propos des phénomènes d'évolution des systèmes, il est donc utile de dissocier la notion de fonction, en distinguant les aspects qualitatifs et les aspects quantitatifs qu'elle

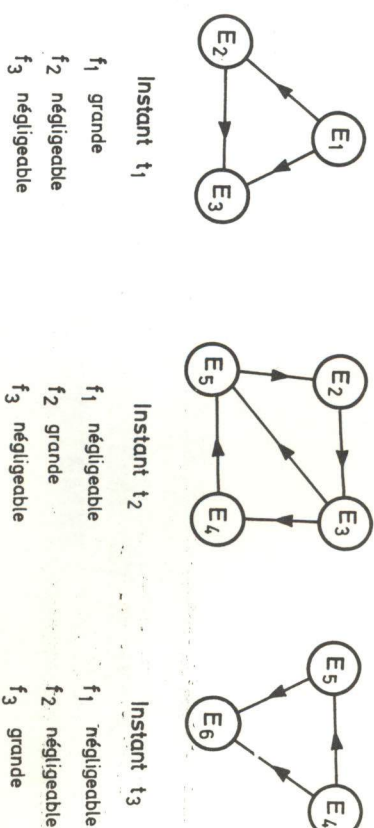


Fig. 37

contient. Finalement, on aboutit ainsi aux correspondances suivantes entre les concepts fondamentaux et les connaissances qui peuvent leur être reliées :

structure relationnelle d'un système → aspects qualitatifs des propriétés intrinsèques de ce système et de son évolution propre.
structures totales de divers systèmes → aspects qualitatifs des interactions possibles entre ces systèmes et de l'évolution du système de systèmes ainsi constitué.
systèmes → aspects qualitatifs et quantitatifs des fonctions et de leur évolution.

CHAPITRE V

THÉORIE D'UN SYSTÈME ET THÉORIE DES SYSTÈMES

Nous allons, dans ce dernier chapitre, examiner comment se présentent les problèmes les plus fondamentaux lorsque l'on cherche à établir la théorie d'un système quelconque. La plupart de ces problèmes ont déjà été rencontrés au cours des chapitres précédents, à des titres divers. Certains ont été traités de manière assez complète, et ne seront donc ici que rappelés brièvement. Ceux qui n'ont été que mentionnés à propos d'une autre question seront exposés de façon plus détaillée. Il s'agit donc de récapituler un certain nombre de problèmes déjà évoqués, mais cette fois sous l'angle de la genèse et de la cohérence de la théorie, et non plus en vue de la seule élucidation des concepts de base. Nous retrouverons ainsi successivement les questions relatives à la partition en classes-repères, à la forme intrinsèque ou extrinsèque des caractéristiques du système, à l'expression littérale des relations entre classes, à la manière dont apparaît la structure totale théorique qui permet d'étudier l'évolution du système, et aux considérations qui interviennent dans le choix du niveau de description. Enfin, nous verrons brièvement à quoi correspond l'op-tique d'une théorie générale des systèmes, et ce que l'on peut espérer de toute progression dans cette voie.

LA DISCRIMINATION DES ÉLÉMENTS ET LEUR RÉPARTITION EN CLASSES-REPÈRES.

Cette opération analytique, qui constitue en réalité le premier pas de toute démarche cognitive, qu'elle soit expérimentale ou théorique, correspond souvent à un processus implicite parce que apparemment évident. La partition en éléments du monde qui nous entoure n'est cependant pas une opération que l'on puisse considérer comme simple, car elle implique à la fois que la division en parties *distinctes* soit significative, et qu'elle reste valable au cours du déroulement des divers phénomènes susceptibles d'intervenir. La première condition correspond à une nécessité logique, un même élément ne

pouvant pas appartenir simultanément à plusieurs classes. En effet, la distinction opérée entre des classes susceptibles d'être occupées simultanément par un même élément n'aurait aucun sens et constituerait même, par son ambiguïté, une source d'interprétations erronées. Nous allons examiner cette question dans le présent paragraphe. La seconde condition est liée à la structure totale théorique nécessaire pour décrire les phénomènes observés, c'est-à-dire l'évolution du système. Nous l'étudierons dans un paragraphe ultérieur.

La partition en éléments nous semble s'imposer de manière naturelle et indiscutable lorsque une ségrégation spatiale nous apparaît directement perceptible. Ceci est lié au rôle particulier que jouent pour nous les coordonnées spatiales. D'un point de vue théorique ces coordonnées peuvent être considérées, au même titre que les autres dimensions, comme faisant partie de l'ensemble des caractéristiques servant à définir un élément. Nous avons déjà rencontré ce problème au chapitre I lorsque nous examinons quels étaient les prédicats qualitatifs susceptibles d'être attribués aux éléments en tant que caractéristiques intrinsèques. Cette situation particulière n'est d'ailleurs pas limitée aux coordonnées spatiales, mais elle s'étend aussi aux caractéristiques dérivées de celles-ci et du temps, comme la vitesse et l'accélération. Il est certain que notre intuition première nous dit qu'un objet donné reste identique à lui-même, qu'il soit situé en un point ou en un autre de l'espace, qu'il soit au repos ou en mouvement. Il est cependant injustifié de donner à cette intuition le caractère d'un principe universel. D'une manière générale nous ne connaissons pas *a priori* les relations qui peuvent exister entre les diverses caractéristiques que nous attribuons à un élément, et il est donc impossible en toute rigueur d'affirmer que certaines d'entre elles sont rigoureusement indépendantes des autres. L'Histoire des Sciences est riche d'exemples où certaines caractéristiques, d'abord supposées indépendantes, se sont révélées, par des observations plus fines, être en fait interdépendantes. La théorie de la relativité est, parmi ces exemples, l'un des plus célèbres.

Le rôle que joue la ségrégation spatiale dans la première phase de l'opération de partition n'est en réalité qu'un aspect particulier du principe général qui doit être mis en œuvre pour effectuer cette opération. L'application de ce principe peut présenter un certain nombre de difficultés, qu'il est bon d'avoir présentes à l'esprit, et dont l'importance risque d'être d'autant plus grande que l'on cherche à élaborer une théorie plus « fine ».

Considérons, par exemple, un système constitué d'éléments que nous caractérisons par les prédicats qualitatifs $a_1, a_2, \dots, a_n$, et par les caractéristiques quantitatives associées $q_1, q_2, \dots, q_n$. On remarque tout de suite que cette simple phrase ne peut en réalité être énoncée qu'après la reconnaissance préalable d'un ou de plusieurs caractères distinctifs qui permettent de donner un sens à la notion même d'élément. Dans le monde matériel, ces premiers caractères distinctifs sont en général les coordonnées spatiales, comme nous venons de le voir.

Pour des notes de musique, ce serait la coordonnée temporelle, c'est-à-dire l'apparition des vibrations sonores à des époques différentes. Ces caractères distinctifs initiaux doivent en toute rigueur être considérés comme des données premières ou, si l'on préfère, comme résultant d'un libre choix, même si ce choix nous semble s'imposer par une nécessité évidente. Ce premier choix entraîne évidemment que les caractères reconnus comme distinctifs des éléments constituent des caractéristiques intrinsèques de ceux-ci. Les autres caractéristiques attribuées ultérieurement aux éléments dépendent en fait de ce choix initial. Nous avons vu en effet qu'elles sont obtenues par une démarche inductive à partir de l'observation des interactions dans lesquelles les éléments sont susceptibles d'intervenir, et de telles observations mettent bien entendu en jeu le choix initial qui permet de reconnaître l'existence d'éléments distincts. Cette situation mérite de retenir l'attention, car le lien originel qu'elle manifeste entre les caractéristiques attribuées à un élément peut se traduire par une interdépendance de ces caractéristiques, s'il ne l'implique pas obligatoirement. Il n'est peut-être pas impossible que des considérations purement théoriques et épistémologiques puissent permettre de préciser les conditions de dépendance ou d'indépendance de ces caractéristiques, selon que l'élément considéré constitue lui-même un système unique ou une juxtaposition de systèmes quasi indépendants. Mais nous n'aborderons pas ici ce problème difficile, et non résolu, dont nous retrouverons cependant un autre aspect à propos de l'expression littérale des fonctions de transfert entre classes. Nous admettrons simplement que l'indépendance de ces caractéristiques, ou leurs liens de dépendance, nous sont connus par les observations qui ont permis de définir ces caractéristiques, observations qui doivent en principe être suffisantes pour nous permettre de décrire les changements que peuvent subir les éléments dans le système considéré. C'est à partir de ces connaissances supposées acquises que nous allons examiner les problèmes liés à la définition des classes-repères. Pour simplifier, nous supposons que les éléments sont qualitativement stables, c'est-à-dire que les prédicats $a_1, a_2, \dots, a_n$ ne sont pas susceptibles de disparition, et que d'autres prédicats qualitatifs ne peuvent pas apparaître. Nous n'aurons donc affaire qu'à des variations quantitatives des caractéristiques $q_1, q_2, \dots, q_n$.

Considérons d'abord le cas extrême dans lequel toutes les caractéristiques sont indépendantes. Chacune d'elles peut prendre une valeur quelconque située dans l'échelle de ses variations possibles, et cela quelles que soient les valeurs prises par les autres caractéristiques. Il y a autant de classes-repères que de jeux de valeurs possibles pour l'ensemble des caractéristiques qui entrent dans la définition de ces classes. Si, au contraire, les caractéristiques présentent entre elles des liens de dépendance, certains jeux de valeurs seulement sont permis et définissent les classes-repères susceptibles d'être occupées. Dans l'inventaire complet de toutes les combinaisons de valeurs, établi en supposant l'indépendance des caractéristiques, certaines

correspondent à des classes qui doivent être exclues puisqu'elles ne peuvent être occupées.

Le problème des exclusions est, d'une manière générale, un problème difficile. Certains de ses aspects semblent évidents ; d'autres, au contraire, apparaissent beaucoup plus obscurs et difficilement prévisibles. En réalité, il y a deux sortes d'exclusions. La première est celle que nous venons de rencontrer ; elle correspond à l'exclusion de classes par suite de l'interdépendance des caractéristiques. La seconde, que nous allons examiner maintenant, concerne la limitation possible du nombre d'éléments par classe. Le premier type d'exclusion est donc en quelque sorte un cas limite du second type, lorsque le nombre d'éléments dans une classe ne peut être que nul.

Considérons une classe E_i définie par les caractéristiques $q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{ni}$. On sait que chacune de ces caractéristiques peut correspondre à une valeur simple ou à une gamme de valeurs, selon les choix que nous faisons pour la définition des classes-repères, et bien entendu aussi selon ce que nous savons des variations possibles des diverses caractéristiques. Supposons d'abord que chaque q_i représente une valeur simple. Le principe de répartition des éléments dans les classes dit simplement que tous les éléments qui possèdent les mêmes caractéristiques $q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{ni}$, appartenant à la classe E_i . Or, ce principe simple peut conduire à des impossibilités ou à des contradictions. Par exemple, si parmi les caractéristiques qui définissent la classe E_i se trouvent les coordonnées spatiales x_i, y_i, z_i , sous la forme de valeurs simples, un seul élément à la fois pourra appartenir à la classe E_i . Cette exclusion, qui résulte de l'axiome selon lequel deux éléments matériels ne peuvent occuper simultanément le même lieu, nous paraît tout à fait naturelle et évidente. Nous verrons tout à l'heure les restrictions que l'on peut cependant apporter à cette évidence. Dans le cas qui vient d'être évoqué, la classe E_i ne pourra être occupée simultanément par plusieurs éléments que si les caractéristiques intrinsèques qui expriment les coordonnées spatiales ne correspondent plus à des valeurs simples x_i, y_i, z_i mais à des gammes de valeurs $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$. Supposons maintenant que, les coordonnées spatiales correspondant à la classe E_i étant ainsi définies par l'élément de volume $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$ autour du point x_i, y_i, z_i , les autres caractéristiques de cette classe, $q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{ni}$, restent définies chacune par une valeur simple. Nous n'éprouverons en général aucune hésitation à considérer comme appartenant à la classe E_i tous les éléments situés dans l'élément de volume $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$ et présentant le même ensemble de valeurs $q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{ni}$. Il n'est cependant pas certain, *a priori*, que cette manière d'opérer soit légitime. D'autres règles d'exclusion peuvent en effet exister en ce qui concerne les caractéristiques $q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{ni}$, comme c'est le cas par exemple pour les quatre nombres quantiques associés à chaque électron dans un atome. Malheureusement, si les exclusions liées à la position spatiale nous paraissent évidentes, nous ne sommes prêts en général à admettre l'existence de règles analogues relatives à d'autres types de caractéristiques qu'après les

avoir observées expérimentalement. Il semble bien que nous ne soyons pas en mesure de prévoir l'existence de telles règles. Si par exemple on considère les règles d'exclusion de Pauli pour les systèmes atomiques, on doit remarquer que leur validité a été dûment constatée, mais qu'il n'a pas été possible d'en donner une démonstration théorique. Il s'agit apparemment d'un principe premier qui regroupe de nombreuses constatations expérimentales, mais qui n'est pas relié à des considérations plus immédiatement accessibles à l'esprit. Ces règles d'exclusion résultent donc de conditions qui nous restent obscures, et peut-être existe-t-il d'autres règles du même type que nous ignorons encore. Il y a donc là une véritable difficulté lorsque l'on cherche à établir une théorie qui ne soit pas seulement la synthèse de résultats expérimentaux connus, mais qui contienne aussi des possibilités de prévision.

Une autre difficulté peut également apparaître, liée à la définition des frontières entre classes voisines dont certaines caractéristiques correspondent à des gammes de valeurs et non à des valeurs simples. Reprenons par exemple le cas des coordonnées spatiales, chaque classe étant définie de ce point de vue par une bande de valeurs pour chacune des coordonnées, c'est-à-dire par un élément de volume d'espace dans lequel doivent se trouver les éléments appartenant à la classe. Cette manière d'opérer est inévitable si l'on admet que chaque élément occupe effectivement un certain volume. Mais, dans ce cas, il faut aussi admettre que chaque classe, compte tenu du volume qui lui est affecté et du volume individuel de chaque élément, ne peut contenir simultanément qu'un nombre limité d'éléments. On voit ainsi apparaître une nouvelle règle d'exclusion, qui se traduit cette fois par une limite supérieure du nombre d'éléments par classe. Malheureusement, la définition exacte de cette limite peut présenter certaines difficultés. Elle serait relativement simple si l'on pouvait toujours considérer qu'un élément donné occupe un volume fixe et impénétrable. Mais si cette manière de voir est grossièrement valable au niveau macroscopique dans le monde matériel, on ne peut pas affirmer qu'elle le reste à tous les niveaux. Il est certain que le nombre maximum d'éléments dans une classe est essentiellement lié aux interactions possibles entre ces éléments, plutôt qu'à ce que l'on pourrait appeler un volume « réel » défini par exemple à partir d'une certaine quantité de matière. Les interactions par chocs mécaniques entre solides impénétrables constituent un cas particulier, et particulièrement simple. Au niveau microscopique, des interactions d'autres types, se produisant par l'intermédiaire de champs divers, sont beaucoup plus fréquentes. Elles mettent en jeu des caractéristiques très diverses, et si elles peuvent se traduire en définitive par un volume apparent pour chaque élément, compte tenu de son environnement, la détermination de ce volume doit être faite dans chaque cas et peut présenter des difficultés plus ou moins grandes. Il peut même arriver que cette grandeur ne puisse être estimée théoriquement, et qu'elle ne soit par conséquent accessible qu'à partir d'observations experi-

mentales. Les exemples de variations du volume apparent des éléments, selon les interactions auxquelles ils participent, sont nombreux. Citons pour mémoire le cas des molécules d'un gaz qui, dans les mêmes conditions de température et de pression, occupent un même volume apparent, qu'il s'agisse de molécules d'un type A , ou d'un type B , ou de l'association chimique AB . Les atomes constitutifs de A et de B subsistent dans la combinaison AB , mais ils semblent alors occuper chacun un volume apparent plus faible. On peut également citer le cas d'un ensemble de particules chargées électriquement, comme un gaz d'électrons, dans lequel chaque particule exclut de son voisinage immédiat les autres particules, délimitant ainsi un volume apparent qui ne peut être évalué qu'en tenant compte des charges électriques en présence, de l'énergie et de la masse des particules.

On voit que la détermination des règles d'exclusion spatiale, sous la forme d'une limite supérieure du nombre d'éléments par classe, peut constituer une opération difficile lors de l'établissement d'une théorie. Il s'agit pourtant là d'un problème de première importance. Le fait de ne pas en tenir compte peut conduire, soit à des contradictions internes de la théorie, soit à des résultats non conformes aux observations expérimentales. En principe, le premier cas pourra se présenter si les phénomènes responsables des interactions qui conditionnent l'exclusion interviennent effectivement dans la théorie, sans que l'on tienne compte explicitement par ailleurs des limites qui en découlent pour le nombre d'éléments par classe. Le second cas ne se rencontrera, en principe, que si ces phénomènes ne sont pas pris en compte dans la théorie; il est alors tout à fait possible d'avoir une théorie présentant une cohérence interne parfaite, mais dont les résultats ne sont pas conformes aux observations expérimentales. Enfin, il est important de se souvenir que les exclusions spatiales ne constituent qu'un cas particulier facilement accessible à notre entendement. L'Histoire des Sciences nous enseigne, comme nous l'avons vu, que des exclusions analogues peuvent exister à propos de caractéristiques autres que les coordonnées spatiales. S'il nous est difficile de faire dans ce domaine des prévisions théoriques, tout au moins est-il bon de se souvenir de cette possibilité, principalement lorsque les développements théoriques conduisent à des contradictions ou à des prévisions erronées.

Un autre problème doit encore être mentionné. Bien qu'également lié aux phénomènes d'exclusion, il ne concerne plus les conséquences de ceux-ci à l'intérieur d'une classe, mais les interférences qui peuvent en résulter entre classes voisines. Nous reprendrons ici encore l'exemple des coordonnées spatiales. Supposons que la classe E_i soit définie, en ce qui concerne la coordonnée x , par la gamme de valeurs δx_i (Fig. 38), et que chaque élément occupe sur cette coordonnée une largeur l . La situation spatiale d'un élément est en général repérée par les coordonnées d'un de ses points, qui peut être par exemple ce que l'on suppose être son centre de gravité. Ce point, représenté par x_i sur la

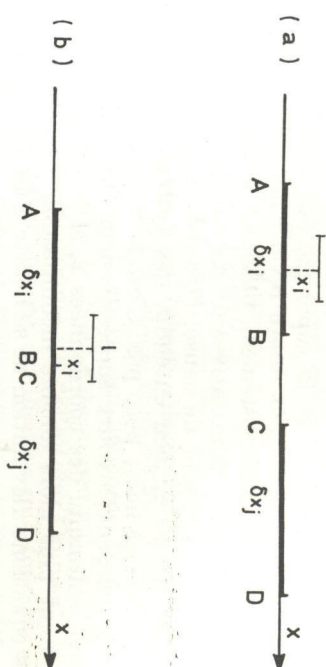


Fig. 38

figure 38, peut évidemment correspondre à une partie quelconque de l'élément, mais il est plus simple d'admettre qu'il est situé au centre de la « bande d'occupation » de celui-ci. Considérons maintenant une classe E_j voisine de E_i et caractérisée par une gamme de valeurs δx_j , et supposons d'abord que les bandes δx_i et δx_j sont contiguës, comme l'indique la Fig. 38 (b). Lorsque la coordonnée x_i est située au voisinage de la frontière commune (B, C), et à gauche de celle-ci selon le schéma 38 (b), l'élément est considéré comme appartenant à la classe E_i , et cependant sa présence en ce point modifie les possibilités d'occupation de la classe voisine E_j . Il existe ainsi une corrélation entre les nombres limites d'éléments dans les classes adjacentes, et ceci se reproduit de proche en proche si toutes les classes sont contiguës. D'un point de vue quantitatif, l'importance du phénomène apparaît évidemment d'autant plus grande que l se rapproche davantage de δx_i . Mais, du point de vue épistémologique, c'est l'aspect qualitatif de la question qu'il importe de prendre en considération. L'existence d'une corrélation de ce type entre classes voisines se traduit par une incertitude en ce qui concerne la définition que nous pouvons donner de chacune de ces classes, car une condition d'exclusion touchant au nombre maximum d'éléments constitue bien une donnée caractéristique de classe. L'imprécision qui entache la définition de chaque classe, et qui peut devenir importante si l est voisin de δx_i , ne peut être compensée qu'en considérant un ensemble de classes de telle manière que la somme des δx_i correspondants soit grande vis-à-vis de l , ce qui revient à adopter un point de vue statistique plus grossier. Si l'on veut préserver l'indépendance des classes et la possibilité de donner de chacune d'elles une définition complète et précise, il est nécessaire de les séparer comme l'indique la Fig. 38 (a), en laissant entre elles un intervalle de l'ordre de l . Dans ce cas, un même élément ne peut plus par sa présence concerner à la fois plusieurs classes, mais il est possible en revanche qu'il ne soit pris en

compte dans aucune classe. On peut dire, en définitive, que la topologie des coordonnées-repères x_i et la topologie des classes δx_i sont différentes. Ce problème peut sans doute revêtir une grande importance, au moins pour certains systèmes, puisque la manière dont nous écrivons les équations quantitatives d'un système suppose une métrique qui doit, en tout état de cause, être cohérente avec la topologie sous-jacente. Il existe, bien entendu, des systèmes pour lesquels ce genre de problèmes ne se pose pas. C'est le cas, par exemple, lorsque un élément unique parcourt successivement les différentes classes-repères. La continuité des coordonnées x_i et la contiguïté des classes ne présentent plus alors aucune incompatibilité, et l'écriture analytique des équations d'évolution ne se heurte à aucune difficulté fondamentale. Nous retrouverons cet exemple prochainement.

Il est nécessaire, ici encore, de se souvenir que les considérations qui viennent d'être développées restent en principe valables pour les caractéristiques autres que les coordonnées spatiales.

CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES ET CARACTÉRISTIQUES EXTRINSÈQUES.

Nous avons vu au chapitre I que, parmi les caractéristiques qui servent à définir entièrement un système, certaines peuvent être traitées comme intrinsèques ou comme extrinsèques. D'autres, comme par exemple les caractéristiques d'un champ extérieur agissant sur l'ensemble du système, sont, notoirement extrinsèques. En fait, si l'on excepte ces actions extérieures, ainsi que les nombres d'éléments dans chacune des classes-repères, toutes les autres caractéristiques peuvent en principe être considérées comme intrinsèques, et à ce titre être attribuées aux définitions des éléments. Nous savons que dans ce cas nous aurons affaire à ce que nous avons appelé un système semi-différencié, et même éventuellement à un système totalement différencié si les caractéristiques quantitatives ne peuvent prendre que des valeurs discrètes, et si chaque jeu possible de valeurs est associé à la définition d'une classe particulière. Cette possibilité est directement liée à la partition en éléments, choisie comme base de la description du système. On peut même dire que ce n'est qu'en atteignant la différenciation totale, que la description théorique du système devient tout à fait homogène et cohérente avec la partition choisie. En pratique cependant, cette situation limite n'est que rarement possible, et certaines caractéristiques qui pourraient en droit être considérées comme intrinsèques sont en fait traduites sous la forme de caractéristiques extrinsèques. On est ainsi conduit à des systèmes théoriques semi-intégrés. Rappelons que la limite dans ce sens, c'est-à-dire le système totalement intégré, correspond à la négation même de la notion de système, celui-ci étant alors considéré globalement, comme un élément unique.

Voyons maintenant quelles sont les conditions qui peuvent conduire à décrire le comportement d'un système réel selon des modèles théoriques plus ou moins intégrés.

Une première raison, très fréquente, résulte de l'existence de caractéristiques quantitatives à variations continues. A chaque définition de classe dans laquelle intervient une de ces caractéristiques correspond une certaine gamme de valeurs susceptibles d'être prises par cette caractéristique. Pour appartenir à une telle classe il n'est plus nécessaire qu'un élément ait, en ce qui concerne la caractéristique considérée, une valeur fixe et bien déterminée ; il suffit que cette valeur soit située dans la gamme de définition. On peut dire aussi que cette manière d'opérer revient à admettre que tous les éléments de la classe ont, *en moyenne*, la même valeur, cette moyenne correspondant à un point particulier de la gamme de définition qui peut être, par exemple, son centre arithmétique. Il s'agit donc bien d'une intégration des caractéristiques quantitatives à variations continues, au niveau des différentes classes-repères. Le degré d'intégration du système est évidemment lié à la largeur des gammes quantitatives associées à chaque classe. Plus les gammes sont étroites, c'est-à-dire plus les sous-classes quantitatives sont nombreuses, plus le système est différencié ou, si l'on préfère, plus son degré d'intégration est faible. Mais il y a, bien entendu, des limites dans la différenciation possible des caractéristiques en variations continues. Lorsque les gammes deviennent de plus en plus étroites, les problèmes évoqués dans le précédent paragraphe, concernant les exclusions relatives au nombre maximum d'éléments par classe et les relations topologiques entre classes voisines, risquent de se poser avec plus d'acuité. Il peut donc être parfois intéressant, pour faciliter l'étude d'un système, de ne pas aller jusqu'à une différenciation trop grande afin d'éviter l'introduction implicite de problèmes théoriques difficiles.

L'intégration dont il vient d'être question ne correspond pas à la traduction de caractéristiques intrinsèques sous forme extrinsèque. Cela provient du fait que les opérations envisagées, par le regroupement plus ou moins poussé de classes quantitatives, ne mettent pas en cause l'existence des prédicats qualitatifs associés en tant que caractéristiques intrinsèques de classes. Elles ne consistent par conséquent que des intégrations partielles, touchant seulement au découpage des gammes complètes à l'intérieur desquelles peuvent varier les caractéristiques quantitatives, et par suite ne concernent que les classes qui comportent dans leur définition les prédicats qualitatifs correspondants. Il peut arriver, dans certaines situations limites, que ces opérations semblent se traduire en définitive comme une véritable transposition de caractéristiques intrinsèques sous forme extrinsèque. Ce serait le cas, par exemple, si toutes les classes comportaient les mêmes prédicats qualitatifs, et si on les regroupait toutes en une classe unique où coexisteraient toutes les valeurs possibles des caractéristiques quantitatives. Les valeurs moyennes de ces caractéristiques, ainsi que les prédicats qualitatifs correspondants,

pourraient alors être considérés comme des caractéristiques extrinsèques puisque celles-ci seraient valables pour l'ensemble du système. Mais on voit tout de suite le côté artificiel d'un tel langage, la notion même de système perdant sa légitimité avec la réduction à une classe unique. En fait, il est beaucoup plus normal de dire dans ce cas que les caractéristiques intrinsèques des classes du système se confondent, à la limite des opérations de réduction de classes, avec les caractéristiques intrinsèques de l'élément unique que constitue le système considéré globalement.

La véritable transposition de caractéristiques intrinsèques en extrinsèques se rencontre lorsque les opérations auxquelles elle correspond n'entraînent pas le passage à une description purement globale. Elle ne doit donc pas concerner toutes les caractéristiques entrant dans la définition des classes mais, en revanche, les caractéristiques sur lesquelles elle opère doivent avoir un sens pour tous les éléments du système, c'est-à-dire doivent être susceptibles d'entrer dans la définition des différentes classes-repères en tant que caractéristiques intrinsèques. Cette dernière condition est évidemment importante puisque une caractéristique extrinsèque est en fait, sous son aspect quantitatif, une moyenne applicable à l'ensemble du système, c'est-à-dire à tous les éléments qui le composent. L'intérêt de transcrire certaines caractéristiques intrinsèques en extrinsèques peut avoir des causes diverses. Le plus souvent, cette opération est inspirée par le souci de simplifier l'étude d'un système qui serait trop compliquée si l'on s'arrêtait à une description théorique très différenciée. Il peut arriver aussi qu'une caractéristique ne nous soit connue que sous forme extrinsèque, et que nous ne sachions pas la traduire sous la forme de caractéristiques intrinsèques précises attribuées aux éléments du système.

Les situations qui viennent d'être évoquées se rencontrent fréquemment dans l'Histoire des Sciences. On peut citer comme exemple typique la théorie cinétique des gaz, qui concerne précisément la transcription des énergies cinétiques, caractéristiques intrinsèques des éléments, en terme de température, caractéristique extrinsèque du système. De ce point de vue, l'optique de la Thermodynamique avec ses caractéristiques de volume, de pression, de température, de chaleur spécifique, etc..., correspond au cas traité précédemment. Les caractéristiques intrinsèques au niveau moléculaire sont alors toutes transposées au niveau global où chaque système moléculaire devient un élément unique. Les échanges de chaleur et de travail qu'étudie la thermodynamique classique concernent des systèmes dont les éléments se situent à ce niveau global, par rapport au niveau moléculaire sous-jacent.

Il est assez constant, dans l'étude de la nature, que les caractéristiques globales soient connues avant les caractéristiques intrinsèques des éléments des systèmes sous-jacents. La température était connue avant que l'on sache la relier aux énergies cinétiques des molécules. Il pourrait donc sembler que la démarche normale consiste à trans-

poser les caractéristiques globales, c'est-à-dire extrinsèques vis-à-vis des systèmes sous-jacents, en termes de caractéristiques intrinsèques des éléments de ces systèmes, comme le fait par exemple la thermodynamique statistique pour les paramètres utilisés par la thermodynamique classique. S'il s'agit bien là en effet d'une démarche courante, le chemin inverse, mentionné plus haut, n'en est pas moins couramment utilisé. Son intérêt est surtout lié à la simplification de certains problèmes. Par exemple, on se trouvera devant cette nécessité si la différenciation d'un système nous conduit à un problème insoluble analytiquement, et que l'on veuille pour des raisons diverses aboutir à l'expression analytique des propriétés du système. En choisissant convenablement les caractéristiques à transposer du niveau intrinsèque des éléments au niveau extrinsèque du système, il est souvent possible de se ramener à un problème plus facilement soluble. L'intérêt des solutions analytiques, même obtenues en sacrifiant la précision de nos connaissances sur certains points particuliers, est évident pour la généralisation des résultats, cette généralisation étant l'un des objectifs essentiels de tout travail théorique.

Un exemple typique où la prise en compte de toutes les caractéristiques intrinsèques des éléments exclut la résolution analytique est celui du problème à N -corps. Pour parvenir à résoudre ce genre de problème, il est nécessaire de transposer les données relatives à la situation spatiale, qui sont des caractéristiques intrinsèques des éléments, jusqu'à un niveau extrinsèque correspondant à la totalité ou à certaines parties du système, en définissant par exemple des quasiparticules qui peuvent être considérées comme presque indépendantes les unes des autres. En principe, les problèmes à N -corps peuvent apparaître à propos d'autres caractéristiques intrinsèques que celles qui expriment les coordonnées spatiales des éléments ou leurs dérivées par rapport au temps. Il suffit pour cela que des caractéristiques quantitatives, attribuées sous forme intrinsèque à plusieurs classes, varient de manière continue en conséquence de relations de dépendance réciproques. On est alors conduit, soit à essayer de se ramener à un problème soluble analytiquement, en procédant aux transpositions de caractéristiques dont il vient d'être question, soit à résoudre le problème de manière non analytique, ce qui revient à introduire des discontinuités à l'intérieur desquelles on admet que les relations de dépendance restent constantes. Nous reviendrons un peu plus loin sur cette question.

La transposition de caractéristiques intrinsèques en extrinsèques constitue une opération qui peut avoir trait, soit à une seule caractéristique à la fois, soit simultanément à plusieurs caractéristiques associées selon un assemblage donné. Par exemple, si l'on considère un ensemble d'éléments matériels doués chacun d'une masse m et d'une vitesse de translation v , la définition d'une caractéristique extrinsèque correspondant à une masse moyenne attribuable à un élément quelconque, obtenue par simple moyenne arithmétique, constitue une opération du premier type. En revanche, la définition

d'une énergie cinétique de translation moyenne fait intervenir simultanément les caractéristiques intrinsèques de masse et de vitesse combinées dans l'assemblage $\frac{1}{2} m v^2$.

On peut se demander à ce propos si l'utilisation de diverses moyennes à l'intérieur d'une même théorie, ne risque pas d'entraîner certains problèmes de cohérence interne plus ou moins cachés. Considérons par exemple trois caractéristiques q_1, q_2, q_3 , qui prennent dans la classe E_i les valeurs q_{1i}, q_{2i}, q_{3i} , dans la classe E_j les valeurs q_{1j}, q_{2j}, q_{3j} , etc... Supposons que les caractéristiques q_1 et q_2 interviennent dans un assemblage $A(q_1, q_2)$, qui apparaît au niveau extrinsèque sous la forme d'une moyenne $A(q_1, q_2)$, obtenue selon une combinaison donnée à partir des assemblages particuliers $A(q_{1i}, q_{2i}), A(q_{1j}, q_{2j}),$ etc... Supposons par ailleurs que la caractéristique q_1 soit également traduite sous la forme d'une caractéristique extrinsèque $\bar{q}_1$, obtenue par une combinaison donnée des valeurs intrinsèques particulières $q_{1i}, q_{1j},$ etc... Alors, la caractéristique q_2 ne peut pas intervenir isolément sous la forme d'une caractéristique extrinsèque correspondant à une moyenne arbitrairement choisie. Si elle intervient à ce niveau, ce ne peut être que sous la forme d'une moyenne $\bar{q}_2$ dont la valeur est imposée dès que les grandeurs $A(q_1, q_2)$ et q_1 sont fixées (1) :

$$\overline{A(q_1, q_2)} \text{ et } \bar{q}_1 \Rightarrow \bar{q}_2$$

Dans un cas simple comme celui-là, aucun problème de cohérence ne se présente si l'on n'est pas conduit à introduire au niveau extrinsèque une moyenne de la caractéristique q_2 , définie indépendamment de cette relation d'implication. Les conditions à respecter apparaissent donc assez simples. En réalité, la situation peut être plus complexe et une incohérence peut s'introduire *implicitement*. Supposons par exemple que les caractéristiques q_2 et q_3 soient combinées dans un assemblage $A'(q_2, q_3)$ et apparaissent au niveau du système sous la forme de la moyenne $A'(q_2, q_3)$. Si q_3 est également traduit sous la forme extrinsèque $\bar{q}_3$ la caractéristique q_2 ne pourra intervenir à ce niveau que par la grandeur $\bar{q}_2$ imposée par la relation d'implication :

$$\overline{A'(q_2, q_3)} \text{ et } \bar{q}_3 \Rightarrow \bar{q}_2$$

La théorie ne sera cohérente que si $\bar{q}_2$ et $\bar{q}_2$ sont identiques.

L'énoncé qui vient d'être fait pourrait laisser croire que les conditions de cohérence interne sont en définitive assez faciles à respecter, pour peu qu'on y porte une attention suffisante. Tel serait bien le cas en effet si l'on connaissait toujours la totalité des caractéristiques intrinsèques susceptibles d'être attribuées aux éléments du système, et s'il s'agissait simplement d'opérer la transposition de certaines d'entre elles au niveau extrinsèque, c'est-à-dire au niveau de la totalité du système. En pratique, cependant, on est loin d'être toujours

dans cette situation idéale. Il arrive fréquemment que l'on connaisse seulement un certain nombre de caractéristiques extrinsèques et un certain nombre de caractéristiques intrinsèques, mais non l'ensemble des caractéristiques utiles à l'un et à l'autre niveaux, et encore moins d'une manière générale les assemblages qui permettent d'exprimer avec une exactitude suffisante les correspondances entre les caractéristiques des deux niveaux. L'établissement de ces correspondances est précisément l'un des objectifs essentiels des théories scientifiques. Compte tenu de cette situation pratique et des incertitudes qu'elle entraîne, on conçoit qu'une théorie puisse contenir des incohérences internes, implicites et difficilement localisables, et qui ne seront décelées que par les prévisions erronées issues de la théorie. Pour reprendre l'exemple précédent, supposons que l'on connaisse les caractéristiques extrinsèques $A(q_1, q_2)$ et $A'(q_2, q_3)$ seulement sous la forme de caractéristiques globales $\bar{Q}$ et $\bar{Q}'$, c'est-à-dire en ignorant les assemblages $A(q_1, q_2)$ et $A'(q_2, q_3)$. Supposons également que l'on connaisse les caractéristiques intrinsèques q_1 et q_3 et que, dans le cadre de la théorie, on les transpose au niveau global sous la forme des moyennes $\bar{q}_1$ et $\bar{q}_3$. La caractéristique q_2 , inconnue, se trouve ainsi implicitement transposée au niveau global selon deux voies différentes, et la cohérence de ces transpositions est directement liée à la manière dont nous repérons les caractéristiques $\bar{Q}$ et $\bar{Q}'$ au niveau global. En particulier, les méthodes employées pour mesurer $\bar{Q}$ et $\bar{Q}'$ peuvent correspondre à la détection de moyennes $\overline{A(q_1, q_2)}$ et $\overline{A'(q_2, q_3)}$ incompatibles avec la cohérence nécessaire relativement à la caractéristique q_2 .

On pourrait également se demander si l'utilisation d'une même caractéristique à la fois au niveau intrinsèque et au niveau extrinsèque, à l'intérieur d'une même théorie, risque d'entraîner aussi certaines difficultés. Ce que nous venons de voir montre qu'il n'y a là, aucun empêchement de principe. Tout au plus pourrait-on craindre parfois dans ce cas une certaine inhomogénéité, mais il s'agit là à vrai dire d'une considération plutôt esthétique, qui ne met pas en cause la validité de la théorie. Les problèmes de cohérence interne, que nous venons d'examiner, sont évidemment beaucoup plus importants. Et nous pouvons dire, en définitive, qu'ils apparaissent lorsqu'une caractéristique se trouve implicitement transposée, à un même niveau, sous la forme de plusieurs moyennes incompatibles. Il serait donc bon, dès qu'une incohérence se manifeste à l'intérieur d'une théorie, d'explorer de manière systématique cette voie, qui est typiquement d'ordre épistémologique.

EXPRESSION LITTÉRALE DES RELATIONS ENTRE CLASSES.

Dans tout système dynamique, les liaisons entre classes expriment les changements que sont susceptibles de subir les éléments du sys-

(1) Le signe $\Rightarrow$ signifie « implique ».

ème. L'existence d'une liaison orientée entre deux classes signifie qu'un élément dont les caractéristiques concordent avec celles qui servent à définir la première classe-repère, peut subir une transformation amenant ses caractéristiques à coïncider avec celles de la seconde classe. Mais une telle relation, considérée du seul point de vue de son existence, ne dit rien des conditions qui président à la transformation qu'elle exprime. Pour préciser ces conditions, il est nécessaire de connaître qualitativement et quantitativement la fonction dont la liaison considérée manifeste l'existence. Entre la classe de départ E_i et la classe d'arrivée E_j , nous avons appelé cette fonction F_{ij} .

D'une manière générale, chaque fonction F_{ij} fait intervenir les caractéristiques intrinsèques de la classe de départ, les caractéristiques extrinsèques du système, et éventuellement les caractéristiques intrinsèques d'autres classes appartenant au système et dont les éléments sont susceptibles d'interagir avec ceux de la classe de départ considérée. Ce dernier cas correspond, comme nous l'avons vu, à l'existence de sous-systèmes d'interaction. Il est important de rappeler que l'absence de sous-systèmes d'interaction ne signifie pas que les éléments des différentes classes n'interagissent pas entre eux. De telles interactions peuvent très bien se traduire par l'intermédiaire de certaines caractéristiques extrinsèques du système, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent. On doit cependant remarquer que seules peuvent s'exprimer de cette manière les caractéristiques qualitatives communes à tous les éléments du système, et vis-à-vis desquelles les diverses classes-repères ne diffèrent que par les caractéristiques quantitatives associées. Autrement dit, les caractéristiques extrinsèques ne peuvent traduire que les aspects qualitativement non spécifiques des interactions entre éléments. En revanche, les interactions spécifiques, c'est-à-dire celles qui ne peuvent se produire qu'entre des éléments se trouvant dans des états bien particuliers, font intervenir obligatoirement des sous-systèmes d'interaction. Par exemple, dans un système moléculaire, les énergies cinétiques des diverses molécules, qui conditionnent les interactions entre ces éléments, peuvent se traduire en terme de température, qui est une caractéristique extrinsèque du système. Les transformations chimiques, qui associent des éléments aux caractéristiques bien déterminées, se traduisent par des sous-systèmes d'interaction. Bien entendu, la température joue un rôle dans les fonctions F_{ij} issues des classes appartenant aux sous-systèmes d'interactions, mais l'absence de tels sous-systèmes n'entraîne pas l'absence d'interactions entre les éléments. Cet exemple montre bien, s'il en était encore besoin, à quel point l'expression des interactions entre les éléments d'un système est étroitement liée aux choix initiaux que nous faisons pour la définition des classes-repères.

On notera également que lorsque l'on parle des caractéristiques intrinsèques d'une classe, il faut entendre par là à la fois les caractéristiques servant à définir un élément quelconque de cette classe,

et le nombre d'éléments contenus dans cette classe à l'instant considéré. En effet, cette dernière caractéristique intervient en général dans les fonctions qui nous occupent ici.

Ainsi, une fonction F_{ij} s'exprime à partir d'un certain nombre de caractéristiques intrinsèques et extrinsèques, selon un assemblage qui introduit des lois de composition diverses entre ces grandeurs. Chaque assemblage, sous sa forme littérale, constitue un véritable système dont les éléments sont les caractéristiques qu'il comporte, et dont les relations sont conditionnées par les opérations qui combinent entre elles ces caractéristiques. On pourrait donc dire que les assemblages correspondant aux fonctions F_{ij} surajoutent à la structure du système étudié, les structures mathématiques qu'ils contiennent. Il faudrait alors admettre que la véritable structure du système comporte l'ensemble des structures ainsi combinées, ou imbriquées. Et il devient dans ce cas légitime de se demander si l'expression littérale des fonctions F_{ij} ne devrait pas figurer parmi les données qui définissent le concept de structure, que celle-ci soit relationnelle ou totale. Nous allons voir que cette manière de faire n'est pas à exclure *a priori*, mais qu'il est difficile de décider une fois pour toutes de sa validité, car elle présente à la fois des avantages et des inconvénients. L'examen de cette question nous permettra également de préciser certains points concernant l'imbrication de la structure totale théorique utilisée pour la description d'un système, et des structures mathématiques qui interviennent dans l'étude de l'évolution de ce système réel. Il s'agit là d'un problème qui présente une grande importance du point de vue épistémologique.

Il est nécessaire de remarquer d'abord que l'assemblage qui intervient dans une fonction F_{ij} constitue une manière d'exprimer les processus selon lesquels les éléments en cause, et éventuellement les actions extérieures, donnent lieu à la transformation correspondante. Nous avons vu qu'un élément qui subit des changements peut être considéré comme un système ou même comme un ensemble, comme une hiérarchie, de systèmes imbriqués les uns dans les autres. Les processus qui viennent d'être évoqués se situent aux niveaux de ces systèmes sous-jacents, et les assemblages de caractéristiques qui interviennent dans l'expression des fonctions F_{ij} représentent, d'une manière globale, l'ensemble de ces processus qui n'apparaissent pas de façon explicite au niveau de description choisi. Le caractère implicite de ces phénomènes résulte directement des définitions adoptées pour les classes-repères, et des situations respectives de ces classes compte tenu des caractéristiques qui servent à les définir. Dire que des éléments quittent la classe E_i pour donner naissance à des éléments de la classe E_j , revient en effet à décrire la transformation par un couple d'états, initial et final. Le détail des états intermédiaires, c'est-à-dire des transformations plus élémentaires, ne pourrait être atteint qu'en descendant à des niveaux de description plus fins. Tant que l'on reste au niveau qui correspond aux états E_i et E_j , ces transformations plus élémentaires n'apparaissent que de manière implicite

et sont contenues globalement dans les assemblages qui expriment les fonctions F_{ij} .

Si l'on se bornait à ces constatations, la prise en compte de l'expression littérale des fonctions F_{ij} dans le concept de structure totale apparaitrait tout à fait légitime, et même souhaitable. Au même titre que les définitions de classes-repères, dans le système supposé semi-différencié, contiennent implicitement les caractéristiques nécessaires à la description des éléments dans les systèmes sous-jacents, on pourrait dire que les assemblages correspondant aux fonctions F_{ij} permettent de tenir compte de manière implicite des relations possibles entre les classes de ces systèmes sous-jacents. On aboutirait ainsi à une notion de structure apparemment très complète et satisfaisante, contenant à la fois la structure totale du niveau de description choisi, de manière explicite, et les structures totales des niveaux sous-jacents, de manière implicite. Malheureusement, cette façon de procéder risque d'introduire des données structurales correspondant à des processus impossibles dans le système réel, et elle peut par conséquent outrepasser le but recherché comme nous allons le voir maintenant.

Supposons par exemple qu'une fonction F_{ij} s'exprime sous la forme d'un assemblage constitué du produit scalaire de deux caractéristiques : $q_1 \cdot q_2$. Introduire cet assemblage littéral dans la définition de la structure totale du système, c'est inclure dans celle-ci toutes les propriétés structurales de l'opération de multiplication scalaire dans l'ensemble des nombres où elle est définie. Ceci serait justifié si les caractéristiques q_1 et q_2 étaient susceptibles de prendre des valeurs quelconques dans cet ensemble, ce qui est loin d'être toujours le cas dans les systèmes que l'on étudie en pratique. En outre, il peut arriver que l'assemblage $q_1 \cdot q_2$ ne soit représentatif des phénomènes qu'à l'intérieur de certaines gammes de variations des grandeurs q_1 et q_2 et qu'il soit nécessaire, à l'extérieur de ces gammes, de le remplacer par d'autres assemblages $A(q_1, q_2)$ faisant intervenir d'autres opérations mathématiques. D'une manière générale, il n'est donc pas légitime d'attribuer *a priori* aux systèmes que l'on étudie toutes les propriétés structurales des assemblages de caractéristiques, tels qu'ils apparaissent dans leur extension maximum lors de l'explicitation littérale des fonctions F_{ij} . Et c'est ce que l'on ferait si l'on introduisait ces expressions littérales en tant que données qualitatives dans le concept de structure totale.

Il semble donc tout à fait justifié d'opérer comme nous l'avons fait au chapitre II, c'est-à-dire de ne prendre en compte les assemblages de caractéristiques exprimant les fonctions F_{ij} que dans la définition complète du système, et non dans la définition de la structure totale. Au niveau du système certains problèmes voisins de ceux que nous venons d'évoquer pourront encore se poser, quoiqu'il d'une manière un peu différente puisque les assemblages qui explicitent les fonctions F_{ij} n'apparaissent plus alors sous leur seul aspect qualitatif, mais aussi avec leurs contenus quantitatifs. Nous allons voir, dans ces conditions, ce qui subsiste des problèmes précédents.

L'étude complète d'un système, de son évolution ou de ses états stables, se fait à partir de l'ensemble des équations qui expriment tous les transferts possibles d'éléments entre les diverses classes-repères. Les assemblages de caractéristiques des fonctions F_{ij} s'introduisent naturellement dans ces équations, et se combinent selon les lois de composition correspondant aux principes adoptés pour l'écriture des équations. Finalement, chaque équation correspond à un assemblage particulier de caractéristiques diverses dont certaines sont constantes, et d'autres variables. La résolution du système d'équations aboutit à divers assemblages, qui permettent de connaître à chaque instant les grands des variables en fonction du temps et en fonction des caractéristiques constantes. Les procédures mathématiques utilisées lors de cette phase de résolution mettent en œuvre les propriétés générales des assemblages contenus dans les équations de départ, en faisant abstraction des restrictions éventuelles qui peuvent limiter le champ de validité de ces propriétés générales dans le système particulier que l'on étudie. Mais la situation est cependant ici un peu différente de ce qu'elle était lorsque nous considérons les assemblages correspondant aux fonctions F_{ij} sous leur seul aspect qualitatif, c'est-à-dire indépendamment du caractère constant ou variable des caractéristiques qu'ils contiennent. Le fait de tenir compte de l'aspect quantitatif, naturellement présent dans les équations du système, limite l'introduction de données structurales supérieures. Un assemblage ne contenant que des caractéristiques constantes est une constante, et n'introduit pas dans le système d'équations les propriétés générales des opérations selon lesquelles se combinent ces caractéristiques. En revanche, un assemblage de caractéristiques variables introduit ces propriétés générales, sans tenir compte des conditions restrictives qu'impose éventuellement le système réel. L'ensemble des équations utilisées pour l'étude d'un système réel constitue donc, en général, un système théorique dont la structure interne est plus large que la structure totale théorique qui serait strictement nécessaire pour la description de tous les états possibles du système. De là résultent ce que l'on appelle couramment les solutions mathématiques sans signification physique. Celles-ci ne peuvent être éliminées qu'après coup, et précisément en introduisant les restrictions qu'impose le système particulier que l'on étudie, sous la forme de conditions initiales, de conditions aux limites, ou d'autres considérations liées à notre connaissance de ce système réel. Du point de vue épistémologique, il est important de bien distinguer ces deux phases de la résolution mathématique et de l'élimination des solutions sans signification pour le système réel, car elles correspondent à des démarches tout à fait différentes, et les connaissances qu'elles peuvent nous apporter sont susceptibles de s'éclairer mutuellement. En particulier, la prise en considération de la nature des conditions restrictives introduites pour l'élimination de certaines solutions peut nous apporter des renseignements très utiles sur les rapports structuraux existant entre le système mathématique utilisé et le système théorique

strictement nécessaire à la description du système réel. Par exemple, le fait de pouvoir éliminer les solutions indésirables par la simple introduction de données quantitatives, relatives à notre connaissance du système à un instant donné, montre que la structure relationnelle du système mathématique utilisé est compatible avec la structure relationnelle du système réel ; le système mathématique constitue une généralisation du système réel en respectant les aspects qualitatifs de celui-ci. Si cette procédure n'est pas suffisante, et qu'il est nécessaire pour éliminer des solutions erronées de faire appel à des considérations plus générales, comme l'impossibilité pour une variable de prendre des valeurs situées dans telle ou telle gamme, on peut en déduire que le système mathématique introduit des données structurales plus larges que celles que requiert la description du système réel. Le système mathématique ne constitue plus une généralisation conforme à la structure relationnelle du système réel, comme dans le cas précédent où les aspects qualitatifs étaient respectés, mais une extension abusive qui introduit des relations n'ayant pas de sens dans le système réel. Cette extension résulte en définitive de la manière dont est faite la mise en équations du système, et des assemblages de caractéristiques que l'on utilise à ce stade. On voit comment l'examen attentif des conditions d'élimination de certaines solutions mathématiques peut être utile pour l'analyse critique de la validité des assemblages utilisés lors de la mise en équations d'un système. Il s'agit là d'un point important, étroitement lié au problème de la correspondance qualitative entre la formalisation mathématique et la structure relationnelle du système que l'on étudie. Nous allons voir maintenant comment se présente cette question selon les méthodes utilisées dans l'étude des systèmes.

STRUCTURE THÉORIQUE EXPLICITE OU IMPLICITE.

Dans les chapitres précédents, nous avons toujours considéré que l'étude d'un système se faisait à partir d'une structure totale théorique définie à l'avance, et à l'intérieur de laquelle on décrivait l'évolution ou les états statiques du système réel. Le cadre théorique nécessaire à la description des différents états possibles du système est alors parfaitement explicite. L'écriture des équations d'évolution pour l'ensemble du système peut introduire des propriétés structurales liées aux assemblages de caractéristiques que contiennent ces équations, et nous venons de voir que ces propriétés peuvent, soit n'avoir pas de sens pour le système réel, soit correspondre à des niveaux de description sous-jacents. Mais, quoi qu'il en soit sur ce point particulier, la structure totale théorique correspondant au niveau de description choisi, c'est-à-dire à la partition des éléments en classes, est dans ce cas bien définie et reste distincte des autres données structurales qui peuvent être introduites par ailleurs. Les résultats obtenus par l'étude théorique des équations, et la confrontation de

ces résultats avec les observations expérimentales, permettent de vérifier la validité du cadre théorique ainsi choisi initialement pour l'étude du système. Nous verrons d'ailleurs un peu plus loin que l'un des buts essentiels de la théorie générale des systèmes est précisément de fournir les moyens de cette vérification, en précisant les liens qui existent nécessairement entre les propriétés d'un système et ses caractéristiques structurales.

Cette première manière d'opérer, dans l'étude d'un système quelconque, n'est pas la seule possible. Il arrive souvent que l'on parte d'équations générales exprimant comment varient les diverses caractéristiques auxquelles on porte attention, qu'il s'agisse de caractéristiques d'éléments ou de caractéristiques du système. On est alors d'emblée en présence d'assemblages littéraux comportant des caractéristiques intrinsèques ou extrinsèques, variables ou constantes. Ces assemblages correspondent à des lois générales, antérieurement connues, et auxquelles sont supposées obéir les variations des caractéristiques que l'on étudie. Par exemple, on se trouve dans cette situation lorsque l'on étudie les variations des coordonnées spatiales, des vitesses et des accélérations d'éléments qui exercent entre eux des forces diverses. Les assemblages qui expriment comment dépendent les unes des autres les caractéristiques considérées, correspondent ici à l'écriture de la loi générale de la Dynamique. Bien entendu, certains systèmes peuvent mettre en jeu simultanément plusieurs lois générales relatives à des caractéristiques diverses.

Comment se situent, dans cette seconde manière d'étudier un système, les différentes catégories de caractéristiques structurales reconnues comme distinctes dans le cadre de la première méthode ? Il semble *a priori* que ces données, qu'elles appartiennent au niveau de partition choisi pour les éléments, ou aux niveaux sous-jacents, ou éventuellement aux propriétés surabondantes des assemblages de caractéristiques, soient ici complètement imbriquées, et comme confondues par l'écriture des équations du système. En fait, il est possible de faire ici encore certaines séparations utiles. On doit d'abord remarquer que la distinction des caractéristiques en intrinsèques et extrinsèques, indispensable pour que les équations écrites aient une signification précise, indique déjà quelles sont les caractéristiques qui servent de base à la partition du système en éléments. Mais la connaissance des classes-repères à laquelle on peut ainsi avoir accès, à partir de l'identification des caractéristiques intrinsèques, ne correspond plus à une définition complète de ces classes comme dans le premier cas. Ces caractéristiques intrinsèques n'interviennent en effet, dans les équations générales du système, que sous une forme littérale qui ne dit rien des grands qui pourront leur être effectivement associées dans les différents états qu'est susceptible d'occuper le système réel, compte tenu des conditions particulières dans lesquelles on l'étudie. Ce n'est qu'à l'issue de la résolution mathématique des équations du système, que ces conditions particulières interviennent et permettront de préciser l'ensemble des caractéristiques

définissant les classes-repères susceptibles d'être effectivement occupées par les éléments du système. En ce qui concerne le cadre théorique nécessaire à la description du système au niveau de partition choisi, on peut donc dire que les équations générales d'où l'on part dans ce cas contiennent implicitement un certain nombre de données structurales, surabondantes pour définir la structure relationnelle mais insuffisantes pour définir la structure totale. Ce n'est que lorsque les grands des caractéristiques quantitatives des éléments sont fixés par l'introduction des conditions particulières propres au système étudié, que se trouvent réunies toutes les données permettant de définir la structure totale théorique. Pour le niveau de partition choisi, et indépendamment des données structurales liées aux assemblages de caractéristiques qui interviennent dans l'expression des relations entre classes, les équations générales comportent donc une généralisation de la structure totale théorique nécessaire à la description du système. Cette structure totale généralisée est en effet la même pour tous les systèmes particuliers ne différant entre eux que par les grands des caractéristiques quantitatives associées aux prédicats qualitatifs servant à définir leurs éléments. Nous verrons, à propos de la théorie des systèmes, que ce type de généralisation correspond à la démarche normale dans l'étude des propriétés générales des diverses catégories de systèmes *isolés*, alors qu'une autre voie doit être suivie pour l'étude générale des interactions entre systèmes.

L'existence de conditions particulières à adjoindre aux équations générales du système, à titre de détermination complémentaire, n'est pas propre au type de description que nous venons d'envisager. On retrouve également de telles conditions dans le cas examiné précédemment. Mais il est important de noter que les conditions particulières n'interviennent pas dans les deux cas au même niveau. C'est d'ailleurs dans cette situation des niveaux de généralisation et de particularisation des équations, que réside la différence essentielle entre les deux modes de description. Dans le second cas, les conditions particulières concernent les valeurs absolues attribuables aux caractéristiques quantitatives entrant dans la définition des éléments. Elles interviennent donc au niveau de la définition complète des classes-repères, et par conséquent de la structure totale théorique nécessaire à la description du système. Les équations générales ne contiennent les données correspondant à cette structure que de manière implicite, et incomplète puisque seules les valeurs relatives des caractéristiques quantitatives pour les différentes classes y subsistent. Dans le premier cas, la structure totale théorique est définie au départ de manière explicite et complète, et elle sert même de fondement à l'établissement des équations générales du système. Les conditions particulières interviennent alors, non plus pour compléter la définition des classes-repères, mais pour préciser le nombre d'éléments contenus dans chaque classe. Elles se situent par conséquent au niveau de la définition complète du système, et non plus à celui de la structure totale.

Bien entendu, le niveau auquel nous situons les équations générales du système ne résulte pas d'un choix arbitraire, qui serait entièrement libre. Il dépend des connaissances antérieures que nous avons, et qui sont applicables au système considéré, ou des hypothèses que nous formulons à ce sujet. Par exemple, pour les deux niveaux de description dont il vient d'être question, le passage du premier au second implique une connaissance préalable, ou une hypothèse, concernant le nombre d'éléments par classe, puisque les caractéristiques correspondantes ne sont plus alors considérées en tant que variables susceptibles de prendre des valeurs quelconques. C'est bien ce qui se passe, pour reprendre un exemple déjà cité, lorsque l'on écrit les équations générales du mouvement pour un système constitué d'éléments qui exercent les uns sur les autres des forces diverses. Les classes-repères correspondent ici aux différents jeux possibles de coordonnées spatiales, de vitesse et d'accélération, pour un élément donné. Parmi les différentes classes-repères que le système d'équations définit comme possibles pour les divers éléments, il est admis implicitement qu'une seule peut être occupée à la fois, et par un élément unique. Ceci résulte immédiatement de la manière dont sont écrites les équations du système, lorsque l'on fait correspondre à chaque élément une équation. Nous retrouvons ici un cas particulier des règles d'exclusion concernant le nombre d'éléments par classe, dont l'importance a déjà été soulignée.

Le fait de situer les équations générales d'un système après la définition explicite et complète de la structure totale théorique, ou en se limitant à une définition partielle, c'est-à-dire purement qualitative, de cette structure, ne dépend pas seulement des connaissances antérieures dont il vient d'être question. Comme nous allons le voir maintenant, d'autres considérations sont susceptibles d'intervenir en faveur de l'un ou de l'autre mode de description.

Les équations générales d'un système se présentent en pratique sous la forme d'équations analytiques. Cela ne résulte pas obligatoirement de la nature des phénomènes et des systèmes en cause, mais bien plutôt d'une transcription à laquelle nous nous efforçons d'aboutir afin de bénéficier du corps de doctrine très développé dont ce type d'équations fait l'objet. Mais les avantages que l'on acquiert de cette manière s'accompagnent de servitudes fondamentales dont le respect, plus ou moins difficile, conditionne l'exactitude des résultats obtenus.

Le caractère continu des fonctions analytiques suppose d'abord que les variations de caractéristiques quantitatives que l'on étudie soient effectivement représentables de cette manière, au moins à titre d'approximation convenable. Si les équations générales se situent au niveau des nombres d'éléments par classe, c'est-à-dire en supposant connue la structure totale théorique, la représentation continue des variations implique, pour être valable, que ces nombres d'éléments par classe restent toujours relativement grands. En toute rigueur, ces grandeurs varient comme la suite des nombres entiers et obéissent donc à des équations diophantiennes ; lorsque les nombres deviennent

petits, c'est à des équations de ce type qu'il faudrait recourir. Si l'on considère maintenant le cas où les équations générales du système expriment, sous une forme analytique, les variations des caractéristiques quantitatives des éléments, des questions analogues de validité se posent. Les propriétés de continuité concernent ici en premier lieu les situations relatives des classes-repères, et supposent que les états possibles pour un élément quelconque sont représentables par les points d'un espace de configuration. Au niveau du système, c'est-à-dire compte tenu de tous les éléments qu'il contient, les règles d'exclusion concernant le nombre d'éléments par classe ne peuvent évidemment pas apparaître dans les équations ainsi écrites. Ces équations contiennent en effet, implicitement, une topologie qui est celle des points d'un continuum, et cette topologie n'est pas forcément celle qui convient aux éléments du système réel. En toute rigueur, il serait nécessaire d'ajouter aux équations générales des règles d'exclusion judicieusement choisies, compte tenu de la partition en éléments adoptée comme base de la théorie et des caractéristiques intrinsèques attribuées à ces éléments. Si la représentation continue constitue sans aucun doute dans de nombreux cas une approximation tout à fait légitime, il n'en reste pas moins vrai qu'il est bon de s'assurer qu'elle n'entraîne pas de contradictions internes importantes. Il est toujours utile de se souvenir que la manière d'écrire les équations d'un système présuppose un ensemble de conditions plus ou moins restrictives, qu'il vaut mieux ne pas laisser dans l'ombre comme s'il s'agissait d'évidences toujours respectées. Leur écriture précise, dans chaque cas, éviterait sans doute bien des difficultés.

Le fait de situer les équations générales d'un système au niveau des caractéristiques quantitatives des éléments implique encore une autre condition limitative. On doit remarquer, en effet, qu'il n'est possible d'opérer de cette manière que si l'on admet que la forme générale des équations reste valable pour toutes les variations possibles des caractéristiques étudiées, c'est-à-dire pour tous les transferts d'éléments d'une classe-repère à une autre, quelle que soit la situation de ces classes à l'intérieur de la structure théorique. Les assemblages de caractéristiques qui interviennent dans l'écriture des équations expriment, en définitive, un certain nombre de relations invariantes entre ces caractéristiques. Le fait que ces relations fixes de dépendance concernent les caractéristiques quantitatives des éléments signifie que les changements subis par ceux-ci correspondent tous à une même loi, ou à un même ensemble de lois. Autrement dit, la représentation analytique d'un système, à ce niveau, ne peut pas tenir compte d'éventuelles variations qualitatives des éléments, si ce n'est de celles qui se traduisent par l'annulation de caractéristiques quantitatives. Mais nous avons vu qu'il s'agit là d'un cas limite très particulier et que, dans la plupart des cas, les variations qualitatives résultent de changements intervenus dans la gamme quantitative susceptible d'être occupée par une caractéristique. Nous savons que ce processus, qui peut s'exprimer d'une manière équivalente en disant

qu'il y a apparition ou disparition d'un prédicat qualitatif, est essentiellement discontinu et ne peut donc être représenté par les équations analytiques situées au niveau des caractéristiques des éléments. Pour parvenir à cela, il faudrait modifier les relations invariantes dont il vient d'être question, selon les classes auxquelles on les applique, puisque les variations qualitatives entraînent des relations de dépendance nouvelles entre les caractéristiques. Ceci reviendrait à écrire divers systèmes d'équations adaptés chacun à une ou plusieurs classes particulières, ce qui correspondrait à une discrimination des classes, et donc à l'introduction des discontinuités indispensables à l'expression des variations qualitatives. On retrouve ainsi l'un des aspects fondamentaux du premier type de représentation, dont la structure totale introduit la séparation des classes-repères, et qui est par conséquent tout à fait adapté à la description de toutes les transformations possibles, quantitatives et qualitatives. A chaque liaison entre classes on peut ainsi faire correspondre une fonction particulière, quels que soient les états relatifs des éléments dans ces classes. Bien entendu, on retrouve également dans les équations analytiques liées à cette représentation un certain nombre de relations invariantes, mais leur signification est tout à fait différente puisqu'elles ne concernent plus alors les caractéristiques des éléments mais les caractéristiques des classes, c'est-à-dire les nombres d'éléments présents à chaque instant dans les différentes classes.

On voit donc en définitive quels sont les propriétés et les problèmes essentiels des deux types de représentation qui ont été évoqués, et qui correspondent à des niveaux différents pour l'écriture des équations générales du système. Le second type, dans lequel la structure totale théorique n'est que partiellement définie, et implicitement contenue dans les équations, exprime sous une forme analytique unique toutes les transformations subies par les éléments, mais il exclut par là même les variations discontinues, qualitatives ou quantitatives. Le premier type au contraire, partant d'une structure totale théorique entièrement et explicitement définie, est adapté à la prise en compte de transformations quelconques. Il est donc utilisable pour l'étude de systèmes très divers, et c'est ce caractère de grande généralité qui justifie l'emploi que nous en avons fait dans les chapitres précédents.

CHOIX DU NIVEAU DE PARTITION.

Les deux types de représentation que nous venons d'étudier concernent uniquement le niveau auquel on situe l'écriture des équations du système. Ils ne mettent pas en cause la partition en éléments, que nous avons admise identique dans les deux cas. La question se pose maintenant de savoir quels critères peuvent présider, en pratique, au choix du niveau de partition. Au début du présent chapitre, nous

avons surtout envisagé les problèmes liés à la discrimination des classes-repères, mais indépendamment du niveau où se situe la partition correspondante. C'est ce dernier point qu'il nous faut examiner maintenant.

Parmi les démarches qui nous conduisent à la connaissance objective du monde qui nous entoure, la plus immédiate concerne l'observation des objets ou des éléments dont les dimensions spatiales se situent à une échelle directement accessible à nos sens. A ce niveau macroscopique, la partition en éléments se fait en général, comme nous l'avons vu, en vertu de critères très simples parmi lesquels intervient en premier lieu la ségrégation spatiale. Dès qu'ont été choisis et appliqués ces critères de partition, il est nécessaire de préciser les caractéristiques intrinsèques des éléments et les caractéristiques extrinsèques du système, à partir de l'observation des fonctions auxquelles participent les éléments, qu'il s'agisse des interactions entre eux ou des actions extérieures qu'ils subissent. C'est alors seulement qu'une théorie du système peut être élaborée, et c'est à ce stade que se pose la question de savoir si les niveaux de partition correspondant respectivement aux observations expérimentales et à la théorie doivent être les mêmes ou si, au contraire, il est intéressant qu'ils soient différents. Avant d'aborder ce problème, il est utile de rappeler quelques considérations générales touchant à la description théorique d'un système quelconque, afin d'éviter toute ambiguïté entre les notions de « niveau de partition en éléments » et de « niveau de description théorique ».

Il est en effet important de noter que si la partition en éléments correspond à un niveau de « découpage du monde » bien déterminé, elle n'entraîne pas l'existence d'un niveau de description théorique unique pour le système constitué par ces éléments. Nous savons que parmi les caractéristiques susceptibles d'être attribuées aux éléments, en tant que caractéristiques intrinsèques, certaines peuvent être traduites sous forme extrinsèque, c'est-à-dire transposées au niveau de l'ensemble du système. Nous en avons rencontré plusieurs exemples dans les chapitres précédents. Il apparaît ainsi une sorte de gradation possible entre le système entièrement différencié et le système totalement intégré, ce dernier nous ramenant au niveau global où le système est considéré lui-même comme un élément unique. On peut dire par conséquent que le niveau de description théorique est dans une certaine mesure ajustable, selon l'importance relative accordée à ces deux processus inverses de différenciation et d'intégration. En outre, nous venons de voir dans le paragraphe précédent que l'écriture des équations du système peut se faire au niveau des nombres d'éléments par classe, ou au niveau des caractéristiques quantitatives des éléments, selon que l'on part d'une structure théorique explicite ou implicite. Cette dernière possibilité, qui apparaît après le choix de la partition en éléments, et après la répartition des caractéristiques en intrinsèques et extrinsèques, ajoute encore à la diversité des niveaux de description théorique auxquels on peut s'arrêter pour un système

donné, et dans le cadre d'un choix déterminé pour le niveau de partition. Bien entendu, tous ces niveaux possibles en principe ne sont pas toujours intéressants, ou même accessibles, en pratique. Certains, très différenciés, peuvent être exclus par une méconnaissance partielle des éléments. D'autres peuvent entraîner une trop grande complexité de la description théorique. Il peut enfin être pratiquement nécessaire d'adopter d'emblée un mode de description particulier, compte tenu de la nature du système étudié ; c'est le cas, comme nous l'avons vu, lorsque les éléments subissent des changements qualitatifs qui exigent la prise en considération explicite de la structure totale théorique du système. Mais toutes ces conditions particulières, propres à tel ou tel type de systèmes, importent peu ici en définitive. Le but des remarques qui viennent d'être faites était seulement de montrer qu'à un niveau de partition donné peuvent correspondre, en principe, plusieurs niveaux de description théorique.

Qu'en est-il maintenant des niveaux de partition adoptés respectivement, comme base des observations expérimentales, et comme fondement de la description théorique ? Il est évidemment toujours possible de confondre ces deux niveaux, et d'établir une théorie en considérant les seules propriétés directement décelées au niveau où se font les observations. Cette manière d'opérer est d'ailleurs celle de toute démarche empirique, et même de toute phénoménologie, au premier sens de ce mot. Mais si l'on observe, comme nous l'avons fait dans les chapitres précédents, qu'un élément qui subit des changements peut être considéré lui-même comme un système, il est tentant d'essayer d'établir la théorie à partir d'un niveau de partition plus fin, plus profond, que celui qui correspond aux observations directes. Cette orientation, qui s'est manifestée tout au long de l'Histoire des Sciences, a permis de progresser peu à peu vers une plus grande unité de nos connaissances ; on peut donc dire qu'elle traduit la tendance réductrice de l'esprit humain qui donne à la notion même de connaissance une grande partie de son sens. Il est certain en effet que la démarche empirique, malgré toute l'utilité pratique qu'elle peut avoir, nous laisse souvent le sentiment d'avoir affaire à une formalisation purement *descriptive* et plus ou moins gratuite de nos observations, tandis que les théories réductrices nous semblent posséder un pouvoir *explicatif* beaucoup plus grand. Cela provient, en grande partie, du caractère de généralisation des théories réductrices, alors que les modèles empiriques ne contiennent, la plupart du temps, rien d'autre que ce qui résulte des observations faites. Les possibilités de prévision par extension donnent aux théories du premier type une richesse que ne possèdent pas les théories du second type, lorsque celles-ci ne constituent effectivement qu'une récapitulation d'observations déjà faites. Bien entendu, on ne peut pas dire que l'adoption d'une même partition de base, pour la théorie et pour les observations expérimentales, entraîne obligatoirement l'élaboration de modèles empiriques limités, comme ceux qui viennent d'être évoqués. Il est possible, également dans ce cas, d'aboutir à des théories très géné-

rales permettant une prévision des phénomènes dans des domaines très larges, non encore explorés expérimentalement. Nous en verrons quelques exemples un peu plus loin. Mais la plus grande extension des théories n'est en général obtenue qu'en recourant, pour l'élaboration théorique, à une partition plus fine que celle qui correspond aux observations expérimentales.

Si l'on considère comme point de départ le niveau de partition correspondant aux observations expérimentales, les possibilités de choix en ce qui concerne les niveaux de partition plus fins, pouvant servir de base aux développements théoriques, dépendent évidemment de l'exploration préalable de ces divers niveaux, pour que soient précisées les caractéristiques de leurs éléments constitutifs. Comme nous l'avons vu, il est intéressant d'essayer de parvenir ainsi à des niveaux où les éléments constitutifs des systèmes sont qualitativement stables, c'est-à-dire dont seules les caractéristiques quantitatives sont encore susceptibles de variations. Le traitement théorique et mathématique, pour lequel les transformations qualitatives constituent toujours une pierre d'achoppement, ne peut que s'en trouver simplifié. En outre, le fait d'attendre à des éléments qualitativement stables s'accompagne en général d'une réduction du nombre de prédicats qualitatifs différents, nécessaires pour rendre compte des phénomènes observés. On s'achemine ainsi vers une plus grande unification théorique des connaissances, ce qui permet de réunir dans un même ensemble conceptuel des domaines d'observations qui, à un niveau plus grossier, apparaissent séparés. Dans le monde matériel, les systèmes atomiques et moléculaires, dont les éléments constitutifs sont les neutrons, les protons et les électrons, correspondent bien à un tel niveau de réduction. À partir de ces trois types de particules et de leurs caractéristiques de masse, de charge électrique, de moment magnétique, de spin, et de situation énergétique, il est possible en principe de rendre compte d'une immense variété de phénomènes que les observations au niveau microscopique conduisaient auparavant à classer dans des domaines très divers, et le plus souvent parfaitement distincts et sans liens apparents entre eux.

Faut-il conclure des observations précédentes à la nécessité d'adopter toujours, comme base de la théorie, la partition la plus fine qui soit connue, et cela quel que soit le niveau où se situent les observations ? S'il s'agit bien là du but ultime que doit poursuivre toute recherche scientifique, on doit aussi reconnaître que, dans l'état actuel des connaissances, ce but est encore souvent très difficilement accessible. Cette exigence, directement liée à la recherche d'une unification de plus en plus grande des connaissances, constitue en fait l'une des différences essentielles entre les objectifs scientifiques et les objectifs techniques, mais elle doit être considérée comme une limite vers laquelle il faut tendre, plutôt que comme une règle à suivre en toute occasion. Si l'on se place à un point de vue moins unitaire, et *a fortiori* à un point de vue pratique, il peut être parfois plus intéressant d'adopter des niveaux de partition identiques, ou assez voisins,

pour la théorie et pour les observations. Cette manière de faire permet souvent d'atteindre à une plus grande simplicité dans l'élaboration théorique, et à des liens plus directs entre les concepts de la théorie et les caractéristiques observées. La seule exigence fondamentale qui subsiste intégralement est de parvenir, pour le niveau de partition choisi, à un ensemble conceptuel cohérent, non contradictoire. L'absence de données relatives aux niveaux sous-jacents peut en réalité rendre cette tâche assez difficile ; elle entraîne en tout cas une plus grande liberté dans le choix des concepts de base, et donne par conséquent à l'intuition un rôle plus important. Il est cependant tout à fait possible, malgré ces difficultés, de parvenir de cette manière à de belles théories, bien construites, précises, et parfaitement adaptées aux phénomènes dont on veut rendre compte. La Théorie de la Chaleur, de Fourier, établie à partir d'observations et de concepts relatifs au seul niveau microscopique, en constitue un remarquable exemple. Pour obtenir les mêmes résultats en partant d'une partition à un niveau microscopique, il est nécessaire d'élaborer une théorie beaucoup plus complexe et d'un maniement moins aisé. Les mêmes constatations peuvent être faites à propos de la Thermodynamique classique. Et si l'on considère le vaste domaine de la Biologie, dans lequel les niveaux imbriqués sont les plus nombreux et les plus complexes, on constate encore que des systèmes conceptuels particuliers ont été choisis pour chaque niveau, afin de décrire convenablement et simplement les phénomènes observés. Les liens entre ces divers niveaux, qu'il s'agisse des molécules, des cellules, des tissus, des organes, ou de l'organisme entier, ne sont que très partiellement décrits, et il semble que l'on soit encore très loin d'une compréhension théorique profonde des connexions qui existent nécessairement entre ces niveaux.

L'exemple de la Biologie met en évidence, de manière très claire, à la fois la nécessité et la difficulté de la démarche unitaire. Tant que l'on reste à un niveau de partition unique, pour les observations expérimentales et pour l'élaboration théorique, les difficultés sont en définitive assez facilement résolues. Et cela surtout en ce qui concerne la théorie, pour laquelle il est toujours possible d'adopter un point de vue empirique aux exigences fondamentales réduites. On remarque d'ailleurs que, dans une telle situation, l'accent est toujours mis davantage sur les difficultés expérimentales que sur les difficultés théoriques. En revanche, dès qu'il s'agit de prendre simultanément en considération différents niveaux de partition, il devient indispensable de mettre en évidence les correspondances existant entre ces niveaux, pour les prédicats qualitatifs et les caractéristiques quantitatives. La difficulté de cette tâche est certaine ; elle s'explique, au moins en partie, par les rapports complexes que nous avons relevés au chapitre IV entre les aspects qualitatifs et les aspects quantitatifs, selon les niveaux de description auxquels on se place. Il semble bien d'ailleurs que ces questions ne pourront être résolues de façon satisfaisante qu'en étudiant, d'une manière approfondie et suffisamment générale, les problèmes liés à l'imbrication des divers types de sys-

tèmes et à leurs relations hiérarchiques ou réciproques. Ceci nous conduit à l'optique de la Théorie des systèmes, dont nous allons voir maintenant les principales orientations.

THÉORIE DES SYSTÈMES.

Les problèmes qui ont été évoqués jusqu'à présent concernent surtout les diverses étapes que l'on rencontre obligatoirement dans l'étude complète d'un système quelconque. A chacune de ces étapes, qu'il s'agisse du choix du niveau de partition, de l'attribution des caractéristiques aux éléments, de l'expression des interactions et des transferts d'éléments entre les classes-repères, correspondent des difficultés diverses que nous avons examinées en détail. Lorsque ces difficultés sont résolues, on procède à la mise en équations, qui est en définitive l'expression de l'ensemble des phénomènes dans le langage particulier de la Mathématique. La résolution destinée à fournir une connaissance complète du système peut alors être faite, d'une manière rigoureuse ou seulement approchée, selon la forme des équations auxquelles on est parvenu. En principe, il est toujours possible d'adopter cette procédure pour l'étude d'un système quelconque ; mais, bien entendu, le caractère plus ou moins satisfaisant des résultats obtenus dépend étroitement de la façon dont sont résolues les diverses difficultés rencontrées. On conçoit facilement que ces difficultés deviennent d'autant plus grandes que les systèmes considérés sont plus complexes, c'est-à-dire qu'ils comportent une plus grande variété d'éléments différents soumis à des transformations obéissant à des lois plus diverses. La nécessité de rechercher certaines lois générales auxquelles obéiraient les systèmes, éventuellement répartis en grandes catégories à partir d'un nombre restreint de données fondamentales, apparaît alors très nettement. Il est évident, en effet, que la connaissance de telles lois est susceptible de simplifier considérablement l'étude d'un système quelconque, dans la mesure où elles font apparaître des propriétés générales indépendantes de certaines données particulières propres au système considéré. On peut alors espérer atteindre les propriétés fondamentales du système, sans passer obligatoirement par une connaissance exhaustive de toutes les caractéristiques qui permettent de le définir entièrement. Or, si l'on préfère, le nombre de caractéristiques indépendantes qu'il est nécessaire de connaître, pour pouvoir conclure à l'existence de telle ou telle propriété générale, se trouve ainsi réduit. C'est bien là en effet, dans la réduction du nombre des caractéristiques indépendantes, que réside l'intérêt de toute loi générale. Tant que ces lois sont ignorées, la connaissance du système se confond avec celle de toutes les caractéristiques qui le définissent entièrement et qui sont alors *ipso facto* considérées comme indépendantes. Au contraire, la connaissance des lois générales réduit, quelquefois de manière considérable, la connaissance nécessaire des caractéristiques particulières. On doit noter également que les lois générales peuvent aussi être utilisées, si on le

désire, dans la démarche inverse qui consiste à retrouver, à partir des propriétés du système, certaines de ses caractéristiques particulières. Ainsi, l'accès à la description complète d'un système ne relève pas exclusivement de la méthode analytique et déductive qui va de la définition des caractéristiques à l'énoncé des propriétés, mais aussi de la méthode synthétique et inductive qui va de l'observation des propriétés aux nécessités qu'elles impliquent quant aux caractéristiques internes du système. En fait, ce second aspect est aujourd'hui encore presque entièrement négligé. Il devrait cependant apparaître, logique et naturel, par l'étroit parallélisme qu'il présente avec ce que nous avons vu des démarches qui permettent de passer de l'observation des fonctions d'un élément aux caractéristiques intrinsèques qui lui sont attribuées. En réalité, on doit reconnaître qu'il existe bien ici une difficulté nouvelle. Il ne s'agit plus de passer de l'observation de propriétés globales à l'attribution de caractéristiques globales, comme c'est le cas lorsque l'on a affaire à des éléments. L'induction doit maintenant opérer entre des propriétés mettant en jeu l'ensemble du système, et certaines données caractéristiques de sa constitution interne. Il y a donc, en fait, passage d'un niveau global à un niveau de système sous-jacent. De là résultent des difficultés certaines, qui ne peuvent être levées que par une connaissance des liens susceptibles d'exister entre les propriétés d'un système et les caractéristiques internes qui le définissent. Et c'est précisément là que se situent les objectifs d'une Théorie Générale des Systèmes, dont l'intérêt apparaît ainsi tout à fait évident. Nous verrons un peu plus loin comment ces questions peuvent, en pratique, être abordées. Mais il n'est peut-être pas inutile auparavant de rappeler que la nécessité d'une telle étude est présente depuis très longtemps, et qu'elle fait l'objet, depuis quelques décennies, d'une formulation de plus en plus précise qui montre clairement qu'il s'agit bien là d'un problème-clé pour la recherche et pour le progrès des connaissances à notre époque.

L'importance de la notion de système, et le besoin d'une théorie générale dans ce domaine, se sont dégagés progressivement au cours de l'Histoire des Sciences. Déjà Aristote disait que « tout ce qui change est divisible », mettant ainsi l'accent sur cette possibilité de décomposer les objets de notre connaissance en systèmes imbriqués les uns dans les autres. Et, comme nous l'avons vu, son concept de Forme peut être considéré comme l'ancêtre de la notion moderne de structure. Au Moyen Âge, les mêmes thèses aristotéliennes, reprises par Thomas d'Aquin, constituèrent la base des études philosophiques de l'École. Si l'on sépare dans ces travaux la part théologique et la part profane, on constate que cette dernière, malgré toutes les critiques qui peuvent aujourd'hui être faites à son encontre sur tel ou tel point, et en particulier sur la notion de substance, constitue l'une des philosophies de la nature les plus pertinentes qui aient été élaborées. Sa valeur réside précisément, nous semble-t-il, dans le rôle de premier plan qu'y joue la Forme, entendons la structure. On

retrouve d'ailleurs dans de nombreux écrits, tout au long des siècles, cette importance accordée à la Forme, en particulier chez les médecins et biologistes pour qui la morphologie constituait longtemps l'une des approches les plus précises du monde vivant. Mais c'est surtout depuis le début du xxe siècle que ces problèmes ont resurgi avec une insistance exceptionnelle. Il ne peut être question de faire ici un inventaire complet des ouvrages qui jalonnent cette voie. Citons seulement, parmi les tentatives les plus significatives dans des domaines divers de la connaissance, le célèbre « *Growth and Form* » de d'Arcy Thompson, les travaux de L. von Bertalanffy, de A. Szent-Györgyi, de N. Rashevsky, de L. L. Whyte, de C. H. Waddington, en Biologie, ceux de W. Koehler en Psychologie de la Forme, ceux de C. Lévi-Strauss en Anthropologie, ceux de Th. Vogel en Physique. Les efforts entrepris en vue de poser les bases d'une véritable Biologie théorique sont orientés d'une manière de plus en plus précise vers les problèmes essentiels des systèmes, et vers les aspects structurels, qualitatifs, topologiques, des phénomènes. Il suffit pour s'en convaincre d'examiner les très nombreuses publications qui paraissent actuellement sur ce sujet, que ce soit dans des revues telles que le « *Bulletin of Mathematical Biophysics* » ou le « *Journal of Theoretical Biology* », dans les comptes rendus de colloques sur la biologie théorique, ou dans des ouvrages comme ceux de W. M. Elsasser ou de R. Thom. Mais on constate aussi, comme il est fréquent lorsqu'il s'agit de sujets nouveaux, qu'un très petit nombre de groupes de recherche se consacrent entièrement à l'étude de ces problèmes. La plupart des contributions proviennent d'individus plus ou moins isolés, mathématiciens, physiciens, et biologistes ouverts aux questions théoriques. Sans doute faudra-t-il attendre encore quelque temps, avant qu'un effort suffisant soit consenti en faveur de ces recherches qui intéressent les domaines les plus divers de la connaissance.

Il est très caractéristique que l'importance de ces problèmes se soit surtout manifestée à propos de la Biologie et des Sciences humaines. C'est en effet dans ces disciplines que se rencontrent les objets d'étude les plus complexes, dans lesquels les imbrications de systèmes et les interactions les plus diverses jouent un rôle manifeste. La première difficulté apparaît lorsque l'on constate, comme nous l'avons fait tout au long de la présente étude, que la résolution de ces problèmes relève des méthodes rigoureuses de la Physique théorique et de la Mathématique, c'est-à-dire de méthodes qui étaient jusqu'à présent étrangères aux disciplines qui se trouvent confrontées à ces problèmes nouveaux. Cette situation n'aurait encore rien de gênant si l'on disposait, en Mathématique et en Physique, des outils appropriés pour ce genre d'étude. Il ne s'agirait alors que d'effectuer une transposition entre disciplines différentes, ce que l'on sait faire en général. Mais tel n'est pas le cas. L'étude précise des lois de la Nature, telle qu'elle est faite en Physique avec tout l'arsenal mathématique disponible, n'a guère concerné jusqu'ici que les systèmes relativement simples que l'on rencontre dans le monde inanimé. Les problèmes liés à l'éla-

boration d'une Théorie Générale des Systèmes sont donc, en réalité, des problèmes nouveaux pour toutes les disciplines. Il semble bien que ce soit là, en définitive, que réside la difficulté majeure à laquelle se heurtent les recherches les plus avancées de notre époque.

S'il est assez facile de montrer la nécessité d'une Théorie Générale des Systèmes, il est en revanche beaucoup plus difficile de préciser quelles sont les meilleures voies pour y parvenir. Presque tout reste à faire dans ce domaine, et les tentatives les plus diverses méritent d'être suivies, car il est impossible de dire aujourd'hui d'où viendront les éclaircissements les plus significatifs. Nous allons examiner quelques-unes des orientations possibles.

Établir une Théorie des Systèmes implique d'abord que l'on ne considère pas tel ou tel système particulier, avec l'ensemble des données qui le définissent entièrement, mais que l'on procède à une véritable généralisation en ne prenant en compte qu'un certain nombre de caractéristiques typiques. On aboutit ainsi à étudier les propriétés communes à toute une catégorie de systèmes qui possèdent les caractéristiques retenues, même s'ils diffèrent entre eux par les caractéristiques qui ont été volontairement rejetées. Selon le nombre et la nature des données retenues, les résultats obtenus présenteront un caractère de généralité plus ou moins grand. La difficulté essentielle réside évidemment dans le choix des caractéristiques qui peuvent permettre d'aboutir effectivement à une généralité satisfaisante, c'est-à-dire à des résultats qui ne seront pas modifiés, pour l'essentiel, par l'adjonction ultérieure des caractéristiques propres à tel ou tel système particulier appartenant à la catégorie générale étudiée.

Comment procéder dans cette démarche ? La première idée qui vient à l'esprit est de retenir uniquement certaines caractéristiques qualitatives, abstraction faite des données quantitatives qui peuvent leur être associées. On peut, par exemple, ne prendre en compte que la structure relationnelle, c'est-à-dire les seules données relatives à l'existence des classes et des relations entre classes, indépendamment des caractéristiques des éléments et des assemblages de caractéristiques associées aux relations entre classes. Une étude menée sur ces bases doit permettre de dégager les propriétés communes à tous les systèmes qui possèdent la même structure relationnelle, quelle que soit la nature des éléments qui les composent. On voit immédiatement que la recherche théorique de ces propriétés ne peut pas être complète si l'on ne retient que les caractéristiques structurales communes à un certain nombre de systèmes particuliers ; il faut encore opérer une véritable généralisation sur les conditions d'existence de ces caractéristiques. C'est seulement en opérant ainsi que l'on pourra reconnaître d'une manière valable pour tous les systèmes, les propriétés qui dépendent effectivement des données contenues dans le concept de structure relationnelle. Pour aboutir à ce résultat, il est nécessaire de considérer un système possédant une structure relationnelle tout à fait quelconque et par conséquent susceptible de représenter tous les systèmes particuliers, quels qu'ils soient. Si l'on étudie les systèmes dyna-

miques dans lesquels les éléments peuvent être transférés dans diverses classes-repères, on satisfait à cette condition en affirmant seulement que le système général est constitué d'un nombre indéfini de classes, entre lesquelles existent des relations de transfert quelconques. A ce niveau de très grande généralité, il est alors possible de dégager les propriétés topologiques et d'ordre, liées à l'existence de quatre types de graphes vrais, telles qu'elles ont été exposées au chapitre IV. Il s'agit là de propriétés valables pour tous les systèmes. Et l'on se souvient que l'étude qui a permis d'obtenir ces résultats a montré également que les données contenues dans le concept de structure relationnelle permettent de prévoir les modifications par réduction qu'est susceptible de subir cette structure, au cours du processus d'évolution. La généralisation obtenue en ne prenant en compte que la structure relationnelle nous conduit donc à dégager un certain nombre de propriétés évolutives intrinsèques des systèmes.

L'élaboration d'une Théorie Générale des Systèmes doit, bien entendu, comporter des chapitres divers correspondant à des degrés de généralisation variés. L'étape que nous venons d'envisager est, sans aucun doute, située à l'un des niveaux de plus grande généralité. A partir de là, l'introduction progressive de conditions plus ou moins restrictives, devrait ouvrir la voie à l'étude de diverses catégories de systèmes, catégories de moins en moins vastes au fur et à mesure que les nouveaux axiomes introduits seront plus nombreux. La véritable difficulté réside évidemment dans le choix de ces axiomes, et dans leur association à la base d'une théorie donnée, compte tenu des problèmes de cohérence interne que cela pose. L'un des buts essentiels des études épistémologiques, comme celle que nous avons tentée ici, est précisément de fournir un guide pour ces choix fondamentaux. Les problèmes que nous avons rencontrés indiquent déjà un certain nombre de points qui, dans l'état actuel des connaissances, ne peuvent être négligés si l'on veut mener à bien cette recherche de base.

L'un de ces points fondamentaux concerne les règles d'exclusion relatives au nombre maximum d'éléments par classe, selon les caractéristiques qui définissent les différentes classes d'un système. Il serait intéressant d'étudier de manière approfondie l'incidence que peuvent avoir diverses règles d'exclusion sur les propriétés générales des systèmes, et en particulier sur les relations obligatoires qu'elles doivent entraîner entre certaines caractéristiques des éléments ou du système considéré. On notera également que ce problème touche d'assez près aux questions que l'on peut se poser quant au rôle que jouent l'identité et la différence entre éléments dans les possibilités d'interactions entre eux. G. Bachelard supputait qu'il ne peut y avoir d'interactions entre éléments identiques (*). S'il s'agissait là d'un

(*) G. Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, P.U.F., p. 80 :

« A l'intérieur de tout système, mieux pour que des éléments forment un système, il faut une diversité mathématique essentielle entre les composants. Ne pourront être identiques que des substances chimiques sans réaction, indifférentes les unes aux autres comme des mondes fermés. »

principe universel, le mode de définition des classes-repères devrait en tenir toujours compte, afin d'éviter toute incohérence. Par exemple, il serait contradictoire d'affirmer d'une part l'identité d'éléments appartenant à une même classe, et d'admettre d'autre part que ces éléments peuvent interagir entre eux. Il faudrait alors, soit introduire un principe d'exclusion limitant à un seul élément à la fois l'occupation d'une classe définie par des valeurs discrètes de toutes ses caractéristiques, soit définir chaque classe par des gammes de valeurs et par une règle d'exclusion fixant un nombre maximum d'éléments compte tenu des largeurs de ces gammes. Si l'on voulait exclure les possibilités d'interactions entre éléments d'une même classe, pour ne les permettre qu'entre éléments appartenant à des classes différentes, les gammes de valeurs associées aux caractéristiques servant à définir ces classes devraient faire l'objet d'un choix judicieux. On remarquera aussi qu'en cherchant à préciser la conjecture de G. Bachelard, on serait conduit à se demander si c'est l'identité qui exclut l'interaction, ou si c'est l'interaction qui détruit l'identité. De la réponse que l'on pourrait apporter à cette question découlerait des implications fondamentales intéressantes, en ce qui concerne aussi bien les interactions des éléments que les interactions des systèmes.

Tous ces problèmes touchant à la définition précise de l'identité et de la différence des éléments, et aux liens existant entre ces caractères et les possibilités d'interactions, n'ont pratiquement jamais été abordés dans leurs aspects théoriques les plus précis. Ils sont pourtant sans aucun doute d'une grande importance, et ne peuvent être passés sous silence dans une Théorie Générale des Systèmes. Il n'est d'ailleurs pas impossible qu'ils ne soient abordables que dans le cadre d'une telle théorie. Ce que nous avons vu au chapitre IV, en ce qui concerne les liens existant entre les propriétés des éléments et le recouvrement de l'espace de configuration dans lequel ils sont représentables, constitue peut être une voie d'approche pour ce problème.

Après l'étude des propriétés générales que l'on retrouve dans tous les systèmes, il serait intéressant de dégager les propriétés que l'on ne rencontre que dans telle ou telle catégorie plus ou moins vaste de systèmes. Il ne peut être question de faire ici un inventaire exhaustif des ensembles de caractéristiques qui pourraient servir de base, dans chaque cas, à une généralisation plus ou moins grande. Ceci est, en pratique, une affaire de choix préliminaire à chaque étude et relève par conséquent, dans une assez large mesure, de l'intuition. Un exemple suffira pour illustrer la méthode. On peut, par exemple, étudier la catégorie constituée par les systèmes à l'intérieur desquels ne se produisent que des changements quantitatifs. Dans l'un quelconque de ces systèmes, toutes les classes-repères sont définies à partir des mêmes prédicats qualitatifs, et les différents classes se distinguent les unes des autres par les grandeurs des caractéristiques quantitatives associées à ces prédicats. On peut alors, en faisant correspondre aux relations entre les classes différents types d'assemblages de caractéristiques, étudier les propriétés qualitatives qui en découlent

pour le système. Un cas limite est celui où, à toutes les relations entre classes correspond un même type d'assemblage littéral de caractéristiques. Nous avons rencontré ce cas à propos de la discussion sur les structures théoriques explicites ou implicites ; il s'y ajoutait même alors des conditions supplémentaires relatives à la définition des classes, à leur contiguïté, et à leur occupation par un seul élément à la fois. C'est ainsi que l'on aboutit, par l'adjonction successive d'axiomes, à des catégories de systèmes de plus en plus étroites. On sait que l'exemple qui vient d'être rappelé correspond à la catégorie des systèmes dans lesquels les variations subies par les caractéristiques des éléments sont exprimables par un type unique d'équations analytiques. Il s'agit donc d'un cas très particulier, par rapport à la variété des systèmes qu'il est nécessaire d'envisager dans le cadre d'une théorie générale. Le fait mérite d'être noté car la plupart des systèmes étudiés par la Physique classique se ramènent en définitive à des systèmes de ce type.

Tant qu'il s'agit des propriétés intrinsèques des systèmes, la généralisation obtenue en ne prenant en compte que les caractéristiques qualitatives, abstraction faite des grandeurs qui peuvent leur être associées dans les divers systèmes particuliers, constitue une démarche fructueuse et relativement simple dans son principe. Mais l'étude des interactions des systèmes montre que ce processus de généralisation ne peut pas toujours être suivi, d'une manière exclusive. Nous avons vu en effet que les interactions susceptibles d'intervenir entre des systèmes, initialement isolés, ne peuvent être déterminées qu'en faisant intervenir les structures totales de ces systèmes. Autrement dit, l'existence des nouvelles liaisons qui apparaissent, du fait des interactions, entre les classes des divers systèmes en présence, ne peut être affirmée qu'en tenant compte des caractéristiques des éléments constitutifs et des contraintes qu'ils subissent par suite de leur insertion dans les systèmes considérés. Or, les définitions des éléments, c'est-à-dire aussi des classes-repères, comportent en général, à la fois des prédicats qualitatifs et des valeurs, ou des gammes de valeurs, particulières correspondant aux caractéristiques quantitatives associées. Et il n'est pas toujours possible de déterminer l'existence des interactions au seul vu des prédicats qualitatifs, sans tenir compte des caractéristiques quantitatives. Comme nous l'avons vu au chapitre IV, ce problème ne peut être résolu, d'une manière générale, qu'à partir de la connaissance des valeurs que prennent ces caractéristiques dans les différentes classes, c'est-à-dire des recouvrements respectifs qu'assurent dans l'espace de configuration les éléments appartenant à ces classes. Ainsi nous constatons que l'affirmation d'existence de données purement qualitatives, ici les relations entre classes appartenant aux divers systèmes, peut exiger la prise en considération de données quantitatives. En fait, cela n'a rien d'étonnant, et fait simplement resurgir le problème délicat des liens possibles entre ces deux types de données selon le niveau de description auquel on se place. Nous nous trouvons bien dans cette situation en passant

du niveau des systèmes, considérés chacun isolément, au niveau du système de systèmes qui se constitue par suite des interactions. Ce n'est qu'après cette étape de jonction entre les systèmes que l'on se retrouve en présence d'un système unique, supposé isolé, et dont certaines propriétés qualitatives intrinsèques peuvent être étudiées indépendamment des caractéristiques quantitatives.

Le problème de l'imbrication des systèmes correspondant aux différents niveaux de partition possibles est, fondamentalement, identique à celui qui vient d'être évoqué. Par exemple, chercher à savoir pour un objet donné comment les caractéristiques structurales correspondant à un niveau de partition conditionnent les caractéristiques structurales à un autre niveau, revient toujours à étudier le passage d'éléments supposés isolés à un système constitué de ces éléments, puis de tels systèmes isolés à un système de systèmes, et ainsi de suite, de niveau en niveau. A chacun de ces passages, il est nécessaire de tenir compte à la fois de données qualitatives, et des données correspondant aux valeurs possibles pour les caractéristiques quantitatives associées.

En définitive, on retiendra que les problèmes de généralisation qui se présentent dans la Théorie des Systèmes ne relèvent pas tous d'une méthode universelle, c'est-à-dire en l'occurrence de la méthode classique qui opère en faisant abstraction des caractéristiques quantitatives et en ne retenant qu'un nombre plus ou moins grand de données qualitatives. Si cette méthode est parfaitement adaptée à l'étude des propriétés générales intrinsèques des systèmes, elle s'avère insuffisante pour aborder le problème des autres propriétés qui interviennent dans le concept général de fonction et qui correspondent aux interactions entre éléments et entre systèmes. La généralisation nécessaire, sur ce second point, ne peut se faire qu'en tenant compte de certains aspects quantitatifs. Le problème qu'elle pose, et qui est très fondamental, est en réalité celui que nous avons déjà évoqué un peu plus haut à propos des liens entre les possibilités d'interactions et les caractères d'identité ou de différence des éléments en présence. Cette nécessaire imbrication des aspects qualitatifs et des aspects quantitatifs, dans les questions les plus fondamentales, constitue sans doute l'une des difficultés majeures qui se sont opposées jusqu'à présent à l'élaboration d'une Théorie Générale des Systèmes.

L'étude des systèmes, aux divers niveaux de généralité dont nous venons d'esquisser les grandes lignes, s'apparente à une synthèse dont le pouvoir heuristique devrait, en principe, être très grand. Ce point mérite d'être examiné d'une manière un peu détaillée.

Il est fréquent de considérer que la synthèse est destinée à réunir, d'une façon concise, un ensemble plus ou moins vaste de données recueillies par l'analyse soignée des phénomènes dans un domaine plus ou moins étendu. La synthèse est alors une sorte de récapitulation, une opération terminale qui couronne une série d'observations en les exprimant sous une forme unifiée. Une synthèse de ce type peut très bien ne diminuer en rien la richesse des observations, si

celles-ci concernent tous les phénomènes que l'on cherche à exprimer d'une manière succincte. L'aspect récapitulatif de la synthèse est dans ce cas prépondérant, tandis que son aspect de généralisation et le pouvoir heuristique qui s'y rattache peuvent être plus ou moins grands. Considérons par exemple la découverte d'une loi, pour un phénomène quelconque. L'aboutissement de cette découverte, c'est l'élaboration d'un assemblage littéral de caractéristiques qualitatives. Quelles que soient les valeurs susceptibles d'être associées à ces caractéristiques, dans le domaine de validité de la loi, celles-ci obéissent entre elles aux relations qu'implique l'assemblage auquel on est parvenu. La loi ainsi trouvée permet une économie des énoncés, puisqu'elle remplace tout un ensemble d'observations. Son pouvoir heuristique peut être grand si, par des moyens théoriques, elle est démontrée comme valable dans des domaines non explorés expérimentalement ; mais il peut être très faible, voire nul, si la loi ne fait que récapituler des observations déjà faites, c'est-à-dire si toutes les caractéristiques qu'elle contient ont été effectivement observées dans tout le domaine de validité.

Mais la synthèse peut aussi être entendue dans un sens plus large, qui correspond aux démarches dans lesquelles l'aspect de généralisation l'emporte nettement sur l'aspect de récapitulation. C'est bien ce qui se produit lorsque le poids accordé à l'élaboration théorique s'accroît. On cherche alors, à partir d'un certain nombre de définitions et d'axiomes, à déduire d'une manière purement logique les propriétés qui en découlent nécessairement, et dont l'observation n'est donc pas indispensable comme préliminaire à la théorie. L'effort principal porte, dans ce cas, sur la cohérence des définitions et des axiomes, sur l'exactitude de l'expression des phénomènes élémentaires par les axiomes, et sur la rigueur de la déduction logique. Bien entendu, la validité de cette démarche suppose que les divers phénomènes qui se produisent dans les systèmes étudiés obéissent à un ordre logique, mais cela ne constitue en définitive que le postulat implicite de toute science. Dans ce type de synthèse, la généralisation s'obtient en abandonnant progressivement un certain nombre de données, que l'on considère comme secondaires par rapport à celles que l'on retient, et qui cependant ne seraient pas négligées dans une récapitulation intégrale. La généralisation opère par ce que l'on peut appeler un appauvrissement axiomatique, par analogie à ce qui se fait en Mathématique. Plus le nombre de caractéristiques retenues est faible, plus la généralité obtenue est grande, mais aussi moins sont détaillées les prévisions que l'on peut faire sur l'état de tel ou tel système particulier. L'ordre dans lequel les caractéristiques sont progressivement abandonnées dans le processus de généralisation ou, à l'inverse, l'ordre dans lequel ces caractéristiques sont réintroduites pour passer des catégories les plus générales aux systèmes les plus particuliers, n'est évidemment pas indifférent. Pour porter tous ses fruits, la généralisation doit respecter l'éventuelle hiérarchie qui peut exister dans l'importance relative des diverses caractéristiques.

Cette manière de faire donne à la théorie son plus grand pouvoir heuristique puisque, dans le cadre des propriétés les plus générales, il devient alors possible de prévoir ce que surajouteront diverses caractéristiques, qui ne modifient pas ces propriétés générales, mais seulement les précisent. On peut également, de cette façon, étudier l'incidence exacte de diverses hypothèses, exprimées sous la forme d'axiomes particuliers, et que l'on adjoint à une base axiomatique plus ou moins étendue.

Le respect, ou la recherche, d'un certain ordre d'importance dans les caractéristiques et les propriétés est certainement l'une des difficultés de la généralisation efficace, mais c'est aussi ce qui différencie, de la manière la plus significative, le second type de synthèse du premier. On remarquera que les objectifs de la Théorie des systèmes, tels que nous les avons brièvement décrits, sont tout à fait conformes à cette exigence. Dans ces conditions, la synthèse n'apparaît plus comme une opération terminale qui exige, pour être menée à bien, une connaissance analytique exhaustive de tous les détails d'un système quelconque. Elle doit être menée parallèlement à l'étude analytique, et même dans certains cas la précéder, puisqu'elle est susceptible de guider les observations vers les faits les plus significatifs, en évitant l'examen sans discrimination de tous les détails quels qu'ils soient. Cette étroite alternance de la démarche analytique et de la démarche synthétique correspond tout à fait à ce qu'affirmait Bergson lorsqu'il disait que « l'esprit de synthèse n'est qu'une plus haute puissance de l'esprit d'analyse ». On doit d'ailleurs constater que cette nécessité a toujours été reconnue par les théoriciens et par les expérimentateurs les plus féconds. C'est ainsi que Henri Poincaré disait qu'« une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison ». Et de son côté, Claude Bernard écrivait que « les faits particuliers ne sont jamais scientifiques : la généralisation seule peut constituer la science (*) » et que « le rôle de la science n'est pas seulement de former le répertoire des faits... L'esprit de généralisation doit mettre en œuvre les matériaux que lui fournit l'esprit d'observation et d'expérimentation (**) ».

Il est utile pour terminer, de dire quelques mots d'un problème que l'on rencontre toujours dès que l'on aborde l'étude de systèmes très complexes. La question qui se pose est de savoir si ces systèmes relèvent effectivement des méthodes des sciences exactes ou, plus précisément, si les connaissances acquises dans les sciences exactes peuvent être extrapolées et servir de base à l'étude de ces systèmes. À titre d'exemple nous considérerons le cas des systèmes biologiques, à propos desquels ce problème se pose depuis longtemps déjà, sous la

(*) Claude Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, p. 158, Paris, 1865.

(**) Claude Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, Tome II, p. 390, Paris, 1879.

forme des tendances opposées du réductionnisme et de l'anti-réductionnisme. Peut-être l'optique de la Théorie des Systèmes, qui se réclame des méthodes de la science exacte, mais qui fait aussi une large place à la généralisation, peut-elle apporter dans ce domaine certains éléments d'appréciation, ou même de conciliation.

Il n'est pas impossible en effet qu'un véritable malentendu soit à l'origine des discussions, voire des polémiques, qui opposent en biologie les tenants du réductionnisme et ceux de l'anti-réductionnisme. Lorsque les seconds disent qu'ils ne croient pas à la possibilité de rendre compte des phénomènes biologiques à partir de considérations purement physico-chimiques, sans doute ont-ils raison s'ils voient cette possibilité sous la forme d'une étude détaillée de tous les aspects d'un organisme biologique, étude qui serait faite à l'aide des connaissances expérimentales et théoriques apportées jusqu'à présent par la physico-chimie. Etant donné la complexité de ces systèmes, leur étude complète n'est pas pensable, dans l'état actuel des connaissances, si l'on entend par là que l'on doit rendre compte d'emblée de tous leurs comportements, de toutes leurs propriétés, sous tous les aspects, qualitatifs et quantitatifs. Mais cette position en quelque sorte « extrémiste » et qui correspond à une exacerbation de l'esprit d'analyse est en définitive assez rare, et elle n'est heureusement pas la seule possible. On peut même dire qu'elle n'est pas très scientifique, puisqu'elle accorde implicitement à tous les phénomènes une même importance relative. Il existe pourtant, de manière souvent très manifeste, une certaine hiérarchie d'importance parmi les phénomènes que l'on peut observer sur un organisme vivant. S'il n'est pas tout à fait intéressant de savoir d'où vient qu'un homme a l'œil bleu ou noir, ou d'où vient qu'il est grand ou petit, cela n'est certainement pas de première importance. Il est sans aucun doute plus intéressant d'essayer de comprendre à quelles propriétés fondamentales de la matière correspondent les grandes fonctions que l'on rencontre dans telle ou telle catégorie d'organismes. Et parmi toutes ces fonctions, les plus communes, c'est-à-dire celles que l'on trouve dans un plus grand nombre d'organismes, comme la reproduction par scissiparité par exemple, possèdent par le fait même le caractère de généralité qui les place au sommet de la hiérarchie d'importance. On doit constater d'ailleurs que le principe de cette hiérarchie est reconnu depuis longtemps, mais d'une manière presque uniquement descriptive, par les critères qu'utilise la Systématique pour la classification des organismes vivants en embranchements, classes, ordres, familles, genres et espèces. Mais il reste à élaborer et à utiliser un principe semblable pour tenter de relier, dans le cadre d'une théorie explicative, les propriétés du monde inanimé et les propriétés du monde vivant. La Théorie Générale des Systèmes, par la place qu'y tiennent obligatoirement la hiérarchie des niveaux de description et les divers degrés de généralisation, apparaît tout à fait adaptée aux recherches qui s'avèrent nécessaires dans cette voie. C'est en essayant de progresser dans ce sens, c'est-à-dire en abordant en premier lieu l'étude des

propriétés les plus générales, pour inclure progressivement les propriétés plus particulières, que les tentatives réductionnistes ont sans doute les meilleures chances de démontrer un jour leur bien-fondé.

L'exemple qui vient d'être évoqué illustre en réalité une préoccupation très générale qui se présente aujourd'hui dans de nombreux secteurs de la recherche, et qui est liée à la complexité toujours plus grande des systèmes que l'on veut étudier. Les problèmes scientifiques qui se posent à notre époque impliquent sans doute un renversement d'optique en ce qui concerne l'importance accordée aux méthodes analytique et synthétique. Par suite du développement comparable des moyens expérimentaux et des moyens théoriques, il semble que soient réunies aujourd'hui, peut-être pour la première fois dans l'histoire des sciences, les conditions pour que la démarche synthétique, dans son aspect de généralisation, apporte une contribution efficace et très précise à l'étude des systèmes complexes, dans l'esprit des sciences exactes. Et sans doute ne s'agit-il pas ici d'une simple possibilité qui pourrait, à notre gré, être ou non suivie. Il s'agit plutôt d'une nécessité imposée par la nature même des problèmes auxquels nous sommes confrontés.

CONCLUSION

Pour analyser le contenu des quatre concepts qui nous ont occupés tout au long de cette étude, l'ordre de présentation adopté nous a semblé être le plus satisfaisant, pour des raisons de logique et de clarté. Il est certain cependant que cet ordre n'est pas le seul possible, puisque ces concepts s'éclairaient mutuellement, et qu'aucun d'entre eux ne peut être saisi dans toutes ses implications sans tenir compte des autres. Le bref survol qui nous permettra, au terme de cette étude, de résumer quelques conclusions essentielles, sera fait dans un ordre différent, plus génétique que didactique.

Dans cette optique, le concept d'évolution apparaît en premier lieu. Sans évolution, c'est-à-dire sans changement, sans mouvement, le monde qui nous entoure serait un monde sans phénomènes, qui ne relèverait que d'une pure description statique. Encore faut-il ajouter que la nécessité de cette description serait absente d'un tel univers, puisque la vie elle-même en serait exclue, et par conséquent aussi tout sujet animé par le besoin de connaître. Le fait que le monde évolue est donc en définitive une évidence. Mais toute évolution implique à la fois des choses qui changent et des choses qui ne changent pas. Si tout ce qui est accessible à notre connaissance changeait simultanément, nous n'aurions aucun moyen de décrire ce qui nous entoure, et nous ne pourrions dégager aucune loi. L'expression d'une loi correspond en effet à la mise en évidence d'une certaine constance dans la manière selon laquelle se produisent les changements. Elle manifeste un caractère invariant, même si celui-ci est seulement local, ou seulement momentané. Un monde sans constantes serait un monde sans lois, y compris les lois statistiques qui expriment à une échelle convenable ce que nous appelons le hasard. Ce serait un monde totalement inintelligible. Le problème n'est donc pas de savoir si le monde évolue, mais plutôt de discriminer dans toute évolution ce qui change et ce qui subsiste. Mettre l'accent sur l'un des aspects, en taisant l'autre ou en minimisant son importance, est une position scientifiquement insoutenable, qui ne peut résulter que de sous-entendus d'ordre métaphysique dont il est nécessaire que la science s'éloigne, dans toute la mesure du possible. La recherche des invariants et l'étude des variables constituent les pôles de toute description scientifique, et sont à l'origine de la plupart des concepts que nous avons rencontrés.

Les notions de fonction et de système apparaissent simultanément dès que nous nous efforçons de connaître le monde qui nous entoure. Nous avons vu comment s'effectue le passage de la perception globale à la connaissance des phénomènes. La première étape de partition en éléments, dès qu'elle est réalisée, implique obligatoirement la prise en considération des relations entre les éléments ainsi définis, et ce sont précisément ces relations qui sous-tendent la notion de fonction. Corrélativement, apparaît la notion de système qui correspond à l'entité que constituent les éléments interagissant. C'est par l'ensemble de ces démarches que nous passons de la perception indifférenciée à l'analyse du monde extérieur, puis à la restitution de ses aspects globaux par la synthèse qu'exprime le concept de système. Toute connaissance scientifique comporte ces diverses étapes. C'est à ce titre que l'on peut dire que tout ce qui touche à l'entendement est système, à commencer par le système le plus élémentaire, mais non le plus simple, que constitue le sujet connaissant et l'objet qu'il appréhende globalement.

Le concept de structure est certainement, parmi ceux que nous avons étudiés, celui dont l'usage est le plus délicat. Nous avons vu qu'il était possible de lui faire correspondre plusieurs définitions précises, et nous avons retenu deux d'entre elles, sous les termes de structure totale et de structure relationnelle. La distinction ainsi opérée est tout à fait fondamentale, et permet d'éviter bien des ambiguïtés. La connaissance de la structure relationnelle d'un système isolé permet de prévoir la propre évolution structurale de celui-ci, à condition que cette évolution se fasse uniquement par réduction de cette structure. Pour prévoir l'évolution par extension, ou les interactions de systèmes, il est nécessaire d'avoir recours à la structure totale. Ce n'est qu'après avoir franchi cette étape qu'il est possible de revenir à la structure relationnelle, pour tout ce qui concerne l'évolution réductrice du système unique auquel on s'est alors ramené. Si l'on applique le concept de structure au cadre théorique qui permet de décrire complètement l'évolution d'un système, on aboutit aux notions de structure totale théorique ou de structure relationnelle théorique qui montrent bien d'où vient l'importance accordée à ce concept. Par son caractère statique et qualitatif il offre en effet une grande « prégnance », et constitue de ce fait l'un des points fixes nécessaires à la description scientifique, l'un de ces invariants dont nous parlions plus haut. C'est sans doute dans la confusion de la structure théorique, qui est fixe, et de la structure du système réel, qui peut être variable, que résident les causes profondes des nombreuses discussions qui se sont élevées à propos du caractère statique et du caractère évolutif des structures. Il n'y a là, en fait, aucune contradiction insurmontable.

Il est nécessaire de dire maintenant quelques mots de l'usage de la Mathématique dans l'étude des phénomènes que nous abordons. La mise en équations présente un certain nombre de problèmes dont l'importance est souvent mésestimée. Ce n'est pas en mathématisant

les phénomènes que l'on entre obligatoirement dans le domaine des sciences exactes, bien que les illusions sur ce point soient fréquentes. La mathématisation porte en fait sur la structure relationnelle théorique, c'est-à-dire sur le cadre général à l'intérieur duquel peut être décrite l'évolution du système que l'on étudie. Cette étape se situe donc à un stade bien défini du processus de connaissance, et il est important de ne pas lui attribuer des vertus qu'elle ne peut avoir. En particulier, elle ne peut rien nous apprendre d'autre, en ce qui concerne les possibilités d'évolution structurale, que ce que nous avons introduit, explicitement ou implicitement, par la mise en équations. On se souvient de la célèbre boutade de Russel, qui disait que « les mathématiques peuvent être définies comme le sujet dans lequel on ne sait jamais de quoi l'on parle, ni si ce que l'on dit est vrai ». Les deux volets de cette affirmation, humoristique et profonde, attirent l'attention sur deux points essentiels. On y retrouve d'abord tout ce qui découle de la distinction entre structure relationnelle et structure totale, la première, sur laquelle porte uniquement la mathématisation, étant indépendante de la nature des éléments, tandis que la seconde ne l'est pas. Le second point peut être relié au problème de la cohérence des définitions que nous adoptions pour les éléments et pour les relations entre éléments. Nous avons assez insisté sur l'importance de l'opération de partition en éléments, et sur les nombreuses questions qui s'y rattachent, pour ne pas y revenir ici. Toute erreur dans ce domaine ne peut être corrigée que par un approfondissement des principes mis en œuvre pour la partition qui, étant antérieure à la mathématisation, ne bénéficie pas des procédés rigoureux et quasi automatiques que l'on utilise dans cette dernière étape. Les développements mathématiques ne peuvent évidemment pas corriger les éventuels défauts de cohérence introduits avant la mise en équations. Tout au plus peuvent-ils parfois manifester certains de ces erreurs, mais le plus souvent sans en révéler l'origine précise. Le mathématicien René Thom écrivait récemment : « La formalisation — en elle-même, disjointe d'un contenu intelligible — ne peut être une source de connaissance. (*) » On ne saurait mieux dire pour marquer toute l'importance de l'étape épistémologique, préalable à la mathématisation. La nécessité de ces études, souvent délaissées ou considérées comme secondaires, apparaît aujourd'hui évidente. Il est souhaitable que des études analogues à celles qui ont été faites depuis le début du ^{xx}e siècle, pour dégager et éclairer les fondements de la Mathématique, soient reprises pour les sciences de la Nature et les sciences humaines. Presque tout reste à faire dans ce domaine. L'intérêt des études épistémologiques ne réside d'ailleurs pas seulement dans les garanties de cohérence interne qu'elles apportent aux travaux théoriques. Par

(*) R. Thom, Topologie et Signification, Revue *l'Age de la Science*, n° 4, Octobre, Décembre, 1968.

l'exigence de rigueur qui les caractérise, et par les nécessités logiques qu'elles peuvent mettre en évidence, elles possèdent aussi un pouvoir heuristique indéniable. On ne peut mieux conclure sur ce point qu'en laissant la parole à A. S. Eddington qui allait jusqu'à dire : « Je crois que toutes les lois naturelles réputées fondamentales peuvent être entièrement prévues à partir de considérations d'ordre épistémologique. (*) »

(*) Cité par E. T. Bell, *La mathématique, reine et servante des Sciences*, Payot, 1953.

PETITE BIBLIOGRAPHIE

- AFCEI. — *Modélisation et maîtrise des systèmes* (2 vol.) — Éditions Hommes et Techniques, Paris, 1977.
- BEISHON (J.), PETERS (G.). — *Systems behaviour* — Harper and Row, London, 1972.
- BERLSKI (D.). — *On systems analysis* — The MIT Press, Cambridge (Mass.), 1976.
- BERTALANFFY (L. von). — *General System Theory* — Braziller, New York, 1969.
- BOUDON (R.). — *A quoi sert la notion de structure ?* — Gallimard, 1968.
- BOURDIEU (P.), CHAMBEREDON (J. C.), PASSERON (J. C.). — *Le métier de sociologue* — Mouton, Bords, 1968.
- BROGLIE (L. de). — *Continu et discontinu en Physique moderne* — Albin Michel, 1941.
- BUNGE (M.). — *Epistémologie* — Maloine, Paris, 1983.
- D'ARCY THOMPSON. — *On Growth and Form* (2 vol.) — Cambridge University Press, 1942 (rééd. 1972).
- DESTOUCHES (J. L.). — *Méthodologie, Notions géométriques* — Gauthier-Villars, 1953.
- EMERY (F. E.). — *Systems thinking* — Penguin Books, Harmondsworth, England, 1969.
- EUGÈNE (J.). — *Aspects de la théorie générale des systèmes* — Maloine, Paris, 1981.
- FAURE (E.). — *L'esprit des formes* — J. J. Pauvert, 1964.
- GANDILLAC (M.), GOLDMANN (L.), PIAGET (J.). — *Entretiens sur les notions de genèse et de structure* — Mouton, La Haye, 1965.
- GUILLAUME (P.). — *La Psychologie de la Forme* — Flammarion, 1937.
- JACOB (F.). — *La logique du vivant* — Gallimard, 1970.
- KLIR (G. J.) (Ed.). — *Trends in General Systems Theory* — John Wiley and Sons, New York, 1972.
- KLIR (G. J.). — *An approach to General Systems theory* — Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1969.
- KOESTLER (A.), SMYTHIES (J. R.). — *Beyond reductionism* — Hutchinson, London, 1969.
- KÖHLER (W.). — *Psychologie de la Forme* — Gallimard, 1964.
- LASZLO (E.). — *The relevance of General System Theory* — George Braziller, New York, 1972.
- LE MOIGNE (J. L.). — *La théorie du système général* — Presses Universitaires de France, Paris, 1977.
- LE MOIGNE (J. L.). — *Analyse de système. Bibliographie et Commentaires* — Université de Droit, d'Economie et des Sciences, Aix-en-Provence, 1978.
- LESOURNE (J.). — *La notion de système dans les sciences contemporaines* (2 vol.) — Librairie de l'Université, Aix-en-Provence, 1982.
- LESOURNE (J.). — *Les systèmes du dessin* — Dalloz Economie, Paris, 1976.
- LÉVI-STRAUSS (C.). — *Anthropologie structurale* — Pion, 1958.
- LÉVI-STRAUSS (C.). — *Les structures élémentaires de la parenté* — Mouton, 1968.
- LICHNEROWICZ (A.), PERROUX (F.), GADOFFRE (G.) (Eds.). — *Structure et Dynamique des systèmes* — Maloine, Paris, 1976.
- LILJENFELD (R.). — *The rise of systems theory* — John Wiley and Sons, New York, 1978.
- LUPASCO (S.). — *Qu'est-ce qu'une structure ?* — Christian Bourgois, Paris, 1967.
- MARTINET (A.). — *Langue et Fonction* — Denoël, 1969.

- MESAROVIC (M. D.) (Editor). — *Views on general systems theory* — John Wiley and Sons, New York, 1964.
- MESAROVIC (M. D.) (Editor). — *Systems Theory and Biology* — Springer Verlag, Berlin, New York, 1968.
- MESAROVIC (M. D.), MACKO (D.), TAKAHARA (Y.). — *Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples* — Economica, Paris, 1980.
- MEYER (F.). — *Problématique de l'évolution* — P.U.F., 1954.
- MONOD (J.). — *Le hasard et la nécessité* — Le Seuil, 1970.
- MOULOUDE (N.). — *Langage et structures* — Payot, 1969.
- MOULOUDE (N.). — *La psychologie et les structures* — P.U.F., 1965.
- PIAGET (J.). — *La structuralisme* — P.U.F., 1968.
- ROOTSMAAR (B. van), STAAL (J. F.) (Editors). — *Logic, Methodology, and Philosophy of Science* — North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1968.
- RUEFF (J.). — *Les Dieux et les Rois* — Hachette, 1968.
- SAUSSURE (F. de). — *Cours de Linguistique générale* — Payot, 1967.
- SEBAG (L.). — *Marxisme et structuralisme* — Payot, 1964.
- SPENGLER (O.). — *Le déclin de l'Occident* — Esquisse d'une morphologie de l'histoire universelle — Gallimard, 1948.
- SIMON (H. A.). — *La science des systèmes* — Epi, Paris, 1974.
- SZENT-GYORGYI (A.). — *Introduction to a submolecular Biology* — Academic Press, 1960.
- THOM (R.). — *Topologie et signification* — Revue « l'Age de la Science » n° 4, Oct. Déc. 1968.
- THOM (R.). — *Topologie et Linguistique* — in *Essays on Topology and related topics* — Springer-Verlag, Berlin, New York, 1970.
- THOM (R.). — *Stabilité structurelle et morphogénèse* — Ed. Benjamin, New York, 1971 et Ediscience, Paris, 1971.
- TONQUEDÉC (J. de). — *Critique de la connaissance* — Lethielleux, 1961.
- TONQUEDÉC (J. de). — *Philosophie de la nature* — 4 vol., Lethielleux, 1956.
- ULLMO (J.). — *La pensée scientifique moderne* — Flammarion, 1969.
- VOGEL (Th.). — *Théorie des systèmes évolutifs* — Gauthier-Villars, 1965.
- VOGEL (Th.). — *Philosophie naturelle et théorie des systèmes évolutifs* — Revue « l'Age de la Science » n° 4, Oct. Déc. 1968.
- WADDINGTON (C. H.). — *New patterns in Genetics and Development* — Columbia University Press, New York, London, 1962.
- WADDINGTON (C. H.) (Editor). — *Towards a theoretical Biology* (4 vol.) — Edinburgh University Press, 1968.
- WATKIN (T. H.), MOROWITZ (H. J.) (Editors). — *Theoretical and Mathematical Biology* — Blaisdell Publishing Company, New York, 1965.
- WHYTE (L. L.). — *Internal factors in evolution* — Tavistock Publications, London, 1965.
- WHYTE (L. L.). — *The unitary principle in Physics and Biology* — The Cresset Press, London, 1948.
- WHYTE (L. L.). — *Aspects of Form* — Indiana University Press, Midland Book, 1961.
- WILDEN (A.). — *Système et Structure* — Borel Express, Montréal, 1983.
- Centre International de Synthèse. — *Notion de Structure et Structure de la connaissance* — Albin Michel, 1957.
- Logique et connaissance scientifique* (sous la direction de Jean Piaget) — La Pléiade, Gallimard, 1967.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
PRÉFACE	5
INTRODUCTION A LA 2 ^e ÉDITION	7
INTRODUCTION A LA 1 ^{re} ÉDITION	9
CHAPITRE I. — LA NOTION DE SYSTÈME.	11
— Les éléments du système.	11
— Interactions et définition des éléments.	15
— Représentation des interactions.	20
CHAPITRE II. — LA NOTION DE STRUCTURE.	37
CHAPITRE III. — LA NOTION DE FONCTION.	53
— Fonction d'un élément dans un système.	53
— Fonction d'un système dans un système de systèmes.	63
CHAPITRE IV. — LA NOTION D'ÉVOLUTION.	91
— Evolution d'un système isolé.	91
— Evolution d'un système non isolé.	105
— Evolution d'un système de systèmes.	111
— Evolution des caractéristiques qualitatives et des caractéristiques quantitatives.	118
CHAPITRE V. — THÉORIE D'UN SYSTÈME ET THÉORIE DES SYSTÈMES.	139
— La discrimination des éléments et leur répartition en classes-repères.	139
— Caractéristiques intrinsèques et caractéristiques extrinsèques.	146
— Expression littérale des relations entre classes.	151
— Structure théorique explicite ou implicite.	156
— Choix du niveau de partition.	161
— Théorie des systèmes.	166
CONCLUSION	179
PETITE BIBLIOGRAPHIE	183

- MESAROVIC (M. D.) (Editor). — *Views on general systems theory* — John Wiley and Sons, New York, 1964.
- MESAROVIC (M. D.) (Editor). — *Systems Theory and Biology* — Springer Verlag, Berlin, New York, 1968.
- MESAROVIC (M. D.), MACKO (D.), TAKAHARA (Y.). — *Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples* — Economica, Paris, 1980.
- MEYER (F.). — *Problématique de l'évolution* — P.U.F., 1954.
- MONOD (J.). — *Le hasard et la nécessité* — Le Seuil, 1970.
- MOULOU (N.). — *Langage et structures* — Payot, 1969.
- MOULOU (N.). — *La psychologie et les structures* — P.U.F., 1965.
- PIAGET (J.). — *Le structuralisme* — P.U.F., 1968.
- ROOTSMAAR (B. van), STAAL (J. F.) (Editors). — *Logic, Methodology, and Philosophy of Science* — North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1968.
- RUEFF (J.). — *Les Dieux et les Rois* — Hachette, 1968.
- SAUSSURE (F. de). — *Cours de Linguistique générale* — Payot, 1967.
- SEBAG (L.). — *Marxisme et structuralisme* — Payot, 1964.
- SPENGLER (O.). — *Le déclin de l'Occident* — Esquisse d'une morphologie de l'histoire universelle — Gallimard, 1948.
- SIMON (H. A.). — *La science des systèmes* — Epi, Paris, 1974.
- SZENT-GYORGYI (A.). — *Introduction to a submolecular Biology* — Academic Press, 1960.
- THOM (R.). — *Topologie et signification* — Revue « l'Age de la Science » n° 4, Oct. Déc. 1968.
- THOM (R.). — *Topologie et Linguistique* — in *Essays on Topology and related topics* — Springer-Verlag, Berlin, New York, 1970.
- THOM (R.). — *Stabilité structurelle et morphogénèse* — Ed. Benjamin, New York, 1971 et Ediscience, Paris, 1971.
- TONQUEDEC (J. de). — *Critique de la connaissance* — Lethielleux, 1961.
- TONQUEDEC (J. de). — *Philosophie de la nature* — 4 vol., Lethielleux, 1956.
- ULLMO (J.). — *La pensée scientifique moderne* — Flammarion, 1969.
- VOGEL (Th.). — *Théorie des systèmes évolutifs* — Gauthier-Villars, 1965.
- VOGEL (Th.). — *Philosophie naturelle et théorie des systèmes évolutifs* — Revue « l'Age de la Science » n° 4, Oct. Déc. 1968.
- WADDINGTON (C. H.). — *New patterns in Genetics and Development* — Columbia University Press, New York, London, 1962.
- WADDINGTON (C. H.) (Editor). — *Towards a theoretical Biology* (4 vol.) — Edinburgh University Press, 1968.
- WATKIN (T. H.), MOROWITZ (H. J.) (Editors). — *Theoretical and Mathematical Biology* — Blaisdell Publishing Company, New York, 1965.
- WHYTE (L. L.). — *Internal factors in evolution* — Tavistock Publications, London, 1965.
- WHYTE (L. L.). — *The unitary principle in Physics and Biology* — The Cresset Press, London, 1948.
- WHYTE (L. L.). — *Aspects of Form* — Indiana University Press, Midland Book, 1961.
- WILDEN (A.). — *Système et Structure* — Borel Express, Montréal, 1983.
- Centre International de Synthèse. — *Notion de Structure et Structure de la connaissance* — Albin Michel, 1957.
- Logique et connaissance scientifique* (sous la direction de Jean Piaget) — La Pléiade, Gallimard, 1967.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
PRÉFACE	5
INTRODUCTION A LA 2 ^e ÉDITION	7
INTRODUCTION A LA 1 ^{re} ÉDITION	9
CHAPITRE I. — LA NOTION DE SYSTÈME.	11
— Les éléments du système.	11
— Interactions et définition des éléments.	15
— Représentation des interactions.	20
CHAPITRE II. — LA NOTION DE STRUCTURE.	37
CHAPITRE III. — LA NOTION DE FONCTION.	53
— Fonction d'un élément dans un système.	53
— Fonction d'un système dans un système de systèmes.	63
CHAPITRE IV. — LA NOTION D'ÉVOLUTION.	91
— Evolution d'un système isolé.	91
— Evolution d'un système non isolé.	105
— Evolution d'un système de systèmes.	111
— Evolution des caractéristiques qualitatives et des caractéristiques quantitatives.	118
CHAPITRE V. — THÉORIE D'UN SYSTÈME ET THÉORIE DES SYSTÈMES.	139
— La discrimination des éléments et leur répartition en classes-repères.	139
— Caractéristiques intrinsèques et caractéristiques extrinsèques.	146
— Expression littérale des relations entre classes.	151
— Structure théorique explicite ou implicite.	156
— Choix du niveau de partition.	161
— Théorie des systèmes.	166
CONCLUSION	179
PETITE BIBLIOGRAPHIE	183

Imprimé en France. — JOUVE, 18, rue Saint-Denis, 75001 PARIS
Dépôt légal : Décembre 1984. — N° d'édition 1699. — N° d'imprimeur 13576.

